

VŠB – Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

**Měření přesnosti obráběcího stroje s využitím  
Ballbar systému**

The Measurement Accuracy of a Machine Tool  
Using Ballbar System

Student: Bc. Václav Král  
Vedoucí diplomové práce: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Ostrava 2015

VŠB - Technická univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra obrábění a montáže

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Václav Král**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2303T002 Strojírenská technologie  
Specializace: 20 Strojírenská technologie  
Téma: **Měření přesnosti obráběcího stroje s využitím Ballbar systému**  
**The Measurement Accuracy of a Machine Tool Using Ballbar System**

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Teoretický základ k problematice.
3. Měření daného stroje se systémem Ballbar.
4. Zhodnocení naměřených hodnot.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 126. ISBN 978-80-248-1641-8.  
[2] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II 2. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008, s. 150. ISBN 978-80-248-1822-1.  
[3] NESLUŠAN, M.; TUREK, S.; BRYCHTA, J.; ČEP, R.; TABAČEK, M. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábání*. 1. vyd. Žilina : Žilinská univerzita v Žiline, EDIS, 2007. 343 s. ISBN 978-80-8070-711-8.  
[4] SHAW, Milton C. *Metal Cutting Principles*. 2nd edition. New York : Oxford University Press, 2005. 651. p. ISBN 0-19-514206-3.

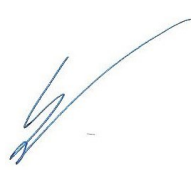
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.**

Datum zadání: 12.12.2014  
Datum odevzdání: 18.05.2015



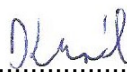
  
Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 18. 5. 2015


  
.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 18. 5. 2015

  
.....  
podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Václav Král

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Vesník I

Lukov 763 17

### **Anotace diplomové práce**

KRÁL, Václav. *Měření přesnosti obráběcího stroje s využitím Ballbar systému*. Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2015, 53s. Diplomová práce.

Vedoucí práce: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

Tato diplomová práce se zabývá měřením a následným vyhodnocení přesnosti obráběcího stroje pomocí Ballbar systému. V teoretické části práce je zpracována problematika přesnosti obráběcích strojů, jsou také zmíněné následky nepřesnosti stroje. Dále jsou popsány současné metody měření přesnosti obráběcích strojů. Následuje popsání Ballbar systému a vzniklých chyb, které se mohou objevit při měření. Praktická část práce se zabývá testováním obráběcího stroje a vyhodnocením výsledků pro jednotlivé pracovní roviny ve dvou měřicích místech. Na základě praktických měření byly stanoveny závěry k jednotlivým měřením a navrženy potřebné opravy. Výsledky jednotlivých měření jsou uvedeny v příloze.

### **Annotation of Master Thesis**

KRÁL, Václav. *The Measurement Accuracy of a Machine Tool Using Ballbar System*. Department of machining, assembly and engineering metrology, Faculty of Mechanical Engineering VŠB –Technical University of Ostrava, 2015, 53s. Master Thesis

Thesis head: Ing. Jiří Kratochvíl, Ph.D.

This thesis deals with the measurement and subsequent evaluation of precision machine tool using Ballbar system. The theoretical part analyzes the problem of precision machine tools, they are also mentioned the consequences of inaccuracies machines. There are also described current methods of measuring accuracy of machine tools. Following describe Ballbar system and resulting errors that may occur when measuring. The practical part deals with the testing machine and the evaluation of results for individual work plane in two measuring points. On the basis of practical measurements were determined conclusions on individual measurements and proposed the necessary repairs. The results of individual measurements are given in the Annex.

## Obsah

<b>Seznam použitých značek a symbolů .....</b>	<b>7</b>
<b>Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>1 Historie .....</b>	<b>9</b>
1.1 Historie určování přesnosti obráběcích strojů .....	9
1.2 Historie číslicově řízených strojů .....	9
1.3 Vývojové stupně číslicově řízených strojů .....	10
<b>2 Přesnost .....</b>	<b>12</b>
2.1 Přesnost a nepřesnost .....	12
2.2 Přesnost obráběcích strojů .....	14
2.2.1 Pracovní přesnost obráběcího stroje .....	14
2.2.2 Geometrická přesnost obráběcího stroje .....	16
2.2.3 Měření geometrické přesnosti .....	20
2.2.4 Současné metody měření geometrické přesnosti .....	21
<b>3 Systém Renishaw Ballbar QC20-W .....</b>	<b>24</b>
3.1 Chyby identifikované dynamickým měřením .....	24
3.1.1 Grafy vzniklé chybou stroje .....	24
3.1.2 Grafy vzniklé chybou testu .....	31
<b>4 Měření daného stroje systémem Ballbar .....</b>	<b>36</b>
4.1 Použitý stroj .....	36
4.2 Popis měření .....	37
4.3 Příprava k testování .....	38
4.4 Nastavení měření .....	39
4.5 Postup měření .....	42
<b>5 Vyhodnocení měření .....</b>	<b>43</b>
5.1 Vyhodnocení měření v rovině XY v obou místech měření .....	43
5.1.1 Zhodnocení naměřených diagnostických chyb .....	43
5.1.2 Vliv měřicího posuvu na obousměrnou odchylku kruhovitosti ..	44
5.2 Vyhodnocení měření v rovině YZ v obou místech měření .....	46
5.2.1 Zhodnocení naměřených diagnostických chyb .....	46
5.2.2 Vliv měřicího posuvu na obousměrnou odchylku kruhovitosti ...	46
5.3 Vyhodnocení měření v rovině ZX v obou místech měření .....	47
5.3.1 Zhodnocení naměřených diagnostických chyb .....	47
5.3.2 Vliv měřicího posuvu na obousměrnou odchylku kruhovitosti ..	48
<b>Závěr .....</b>	<b>50</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>51</b>
<b>Seznam příloh .....</b>	<b>53</b>

## Seznam použitých značek a symbolů

$\Delta t$	odchylka tvaru	[mm]
$\Delta p$	odchylka polohy	[mm]
$\Delta f$	odchylka rozměru	[mm]
Msi	skutečný rozměr	[mm]
Mm	jmenovitý rozměr	[mm]
Fp	radiální složka síly	[N]
CW	pohyb měření ve směru hodinových ručiček	[-]
CCW	pohyb měření proti směru hodinových ručiček	[-]
EXX	přesnost najetí do polohy v ose X	[ $\mu$ m]
EYY	přesnost najetí do polohy v ose Y	[ $\mu$ m]
EZZ	přesnost najetí do polohy v ose Z	[ $\mu$ m]
EYX	odchylka přímosti Y ve směru osy X	[ $\mu$ m]
EZX	odchylka přímosti Z ve směru osy X	[ $\mu$ m]
EXY	odchylka přímosti X ve směru osy Y	[ $\mu$ m]
EZY	odchylka přímosti Z ve směru osy Y	[ $\mu$ m]
EXZ	odchylka přímosti X ve směru osy Z	[ $\mu$ m]
EYZ	odchylka přímosti Y ve směru osy Z	[ $\mu$ m]
EAX	naklápění ve směru osy X („roll“)	[°]
EBX	klopení ve směru osy X („pitch“)	[°]
ECX	natáčení ve směru osy X („yaw“)	[°]
EAY	naklápění ve směru osy Y („roll“)	[°]
EBY	klopení ve směru osy Y („pitch“)	[°]
ECY	natáčení ve směru osy Y („yaw“)	[°]
EAZ	naklápění ve směru osy Z („roll“)	[°]
EBZ	klopení ve směru osy Z („pitch“)	[°]
ECZ	natáčení ve směru osy Z („yaw“)	[°]
A0Z	kolmost v rovině Y-Z	[ $\mu$ m/m]
B0Z	kolmost v rovině Z-X	[ $\mu$ m/m]
C0Y	kolmost v rovině X-Y	[ $\mu$ m/m]

## Úvod

V dnešní době značně narůstají požadavky na co největší přesnost obráběcích strojů. Je také vyvíjen vysoký tlak na zvyšování dynamických parametrů strojů při zachování vysoké přesnosti a jakosti výsledného výrobku (výrobní přesnosti), dále se zvyšují nároky na bezporuchový chod strojů a tím se zmenšují náklady na údržbu. Tyto skutečnosti vedou k zavádění diagnostiky strojů. Díky těmto skutečnostem také vývoj obráběcích strojů přímo ovlivňuje vývoj v oblasti měřicí techniky a měřících metod.

Velká část součástí je z kovového materiálu a vyrábí se na různých obráběcích strojích. Výsledkem nepřesné výroby součástí stroje vzniknou v jeho prostoru geometrické chyby stroje. Při výskytu těchto chyb je důležité jejich určení, protože tvoří převážnou část celkových nepřesností stroje. Po určení následuje jejich eliminace, pomocí které dojde ke zlepšení stavu stroje a zkvalitnění výroby. Jedna z nejčastěji používaných metod je měření kruhové interpolace (zkouška kruhovitosti). Tato zkouška odhaluje chyby dvou os, které jsou obsaženy v testované rovině. V současné době kruhový pohyb v jedné rovině je základní funkce u většiny obráběcích strojů, a proto lze kruhovitost s pomocí vhodných přístrojů docela snadno identifikovat. Tato metoda je také časově nenáročná a zároveň efektivní. Proto se používá u přejímacích zkoušek stroje a vzniklé protokoly jsou důležitou charakteristikou daného stroje jak pro výrobce, tak pro zákazníka.

Příkladem jednoduchého určení odchylek kruhovitosti je testování kruhové interpolace měřícím systémem Ballbar. V této diplomové práci byl použitý přístroj od společnosti Renishaw, který provede analýzu dat v souladu s různými mezinárodními normami. Pokud se využije Ballbar diagnostika, tak umí vyhodnotit nejen kruhovitost, ale i konkrétní chyby stroje podílející se na odchylce kruhovitosti. Dokáže také procentuálně rozdělit jejich zastoupení. Právě zmíněné chyby byly řešeny v této práci a poté následovalo jejich vyhodnocení.



# 1. Historie

## 1.1 Historie určování přesnosti obráběcích strojů

První pokusy o vypracování a zveřejnění přejímacích podmínek pro přesnost obráběcích strojů byly učiněny mezi lety 1900 – 1907 britskými a americkými výrobci. Tyto podmínky sloužily spíše pro komerční účely, obsahovaly pouze záznamy hodnot přesnosti, kterých bylo dosaženo při výrobě [1].

Roku 1901 byl v Berlíně požádán vedoucí inženýr firmy Ludw. Loewe Comp. Pan dr. G. Schlesinger, aby vypracoval předpisy pro přesnost jednotlivých druhů strojů. Tyto materiály měly sloužit pouze interně. K roku 1903 již existovaly firemní předpisy pro 40 druhů obráběcích strojů. V letech 1909 – 1931 byl dr. Schlesinger vedoucím komise v německém spolku výrobců obráběcích strojů [1].

Před první světovou válkou si ruská vláda objednala velké množství obráběcích strojů v Německu. Později došlo k neshodám ohledně přejímacích podmínek a deklarované příliš velké přesnosti. Tyto podmínky byly povětšinou nepřijatelné pro příliš úzké tolerance. To vedlo k prodražování a prodlužování výroby [1].

Vše vyústilo k četným arbitrážním sporům, kde byl určen hlavním rozhodčím dr. Schlesinger. Nakonec se obě strany se dohodly, aby dr. Schlesinger vypracoval všeobecně platné předpisy pro přesnost obráběcích strojů [1].

V září roku 1927 bylo zveřejněno první vydání Schlesingerových předpisů pro přesnost obráběcích strojů, jež byly přijaty oběma stranami [1].

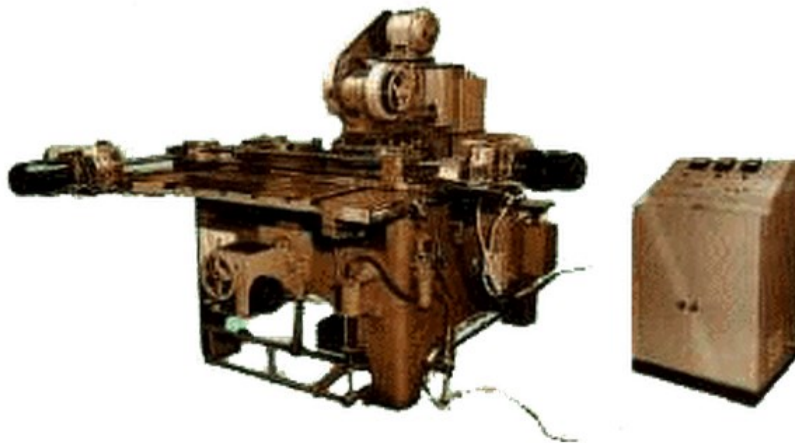
Za dalšího průkopníka je považován francouzský vládní inspektor pro obráběcí stroje P. Salmon. Ten však na problematiku nahlížel jinak, neřešil přesnost stroje, ale přesnost obrobku [1].

Oba pánové se také konfrontovali při několika mezinárodních komisích. Z dnešního pohledu jsou předpisy a normy výše uvedených pánu nepřijatelné, avšak nelze jim upřít velkou zásluhu na zdokonalení a zpřesnění světové strojírenské výroby [1].

## 1.2 Historie číslicově řízených strojů

Pod zkratkou NC se skrývá anglické označení numerical control, které nesly první programované stroje vyvinuté již v 50. letech 20. století v USA a Japonsku. Tehdy se jednalo se o klasický stroj vybavený jednoduchým řídicím systémem s elektronkovými obvody. Program byl ukládán na mechanické paměti v podobě šablon, váček nebo mechanických zářezek, které byly postupně nahrazovány optickými snímači a děrnými páskami. [2].

Své uplatnění v této podobě nacházely nejčastěji při složitých součástech ve velkých sériích jako vrtačky a vyvrtávací stroje, kde umožnily zcela automatický proces výroby probíhající samostatně a bez zásahu obsluhy. Práce člověka se omezila jen na vkládání a vyjímání polotovaru [2].



Obr. 1.1 První NC stroj z roku 1951[2]

Postupem času se však projeví limity NC strojů kvůli jejich pevně propojeným elektronickým prvkům. Proto začaly být NC stroje vybavovány počítačem a právě zde se začala psát historie CNC strojů. Jejich zrod představoval revoluční novinku, kterou byla možnost program a průběžně upravovat během zkoušení [2].

Díky počítači došlo nejen k uchovávání dat k pozdějšímu využití a změnám, ale výrazně se zjednodušil a urychlil samotný proces programování a řízení strojů. Počítač podstatně zjednodušil a urychlil programování, řízení stroje a umožnil uchovávání dat pro pozdější použití. Výroba se rázem stala kvalitnější, výkonnější, omezila se v ní zmetkovitost a odehrává se na menší ploše a snížila se i její cena. Právě proto jsou dnes CNC stroje nedílnou součástí všech pracovišť zaměřených na strojírenskou výrobu [2].

### **1.3 Vývojové stupně číslicově řízených strojů**

#### **Stroje 1. generace**

Jednalo se o NC stroje, které byly odvozeny od běžných konvenčních strojů a přizpůsobovaly se NC řídicím systémům. Stroje jsou upraveny a je k nim přidělen číslicově řídicí systém. Tato generace umožňovala řízení v pravoúhlých cyklech. Bohužel tento typ začal být nevyhovující z hlediska přesnosti výroby, spolehlivosti a technologických možností [3].

### Stroje 2. generace

Tyto stroje byly konstruovány s ohledem na požadavky číslicového řízení. Stroje byly vybaveny servomotory, které umožňovaly řízení v obecných cyklech a systémem automatické výměny nástrojů popřípadě revolverovými hlavami. Výměna opotřebovaných nástrojů byla ruční. Výjimečně byly některé stroje (většinou soustruhy) vybaveny dopravníkem třísek. Jednalo se o stroje, které nebylo možné použít do automatizovaných linek. Jednalo se například o jedno z prvních obráběcích center Milwaukee-Matic od firmy Kearney and Trecker znázorněné na obr.1.1 [3].

### Stroje 3. generace

Stroje byly uzpůsobeny hlavně pro provoz ve výrobních soustavách. Zásobníky na nástroje měly větší kapacitu. Řídicí systém si automaticky zvolil požadovaný nástroj, ovšem výměna opotřebovaných nástrojů probíhala stále ručně. Stroje byly vybaveny systémem automatické výměny obrobku [3].

### Stroje 4. generace

O těchto strojích se dá říct, že jsou plně automatizované, neboť už i výměna opotřebovaných nástrojů je prováděna automaticky. U těchto strojů jsou zaváděny progresivnější metody v konstrukci a využití (uplatnění laserových paprsků v měření i řízení). Začala se řešit i problematika nežádoucích vlivů (např. vliv prostředí, kvalita energetických zdrojů, teplota, prašnost, otřesy apod.), které byly dosud zanedbávány [3].

### Stroje 5. generace

Po úspěšném zautomatizování základních funkcí CNC obráběcích strojů předchozí generace se v konstrukcích strojů 5. generace začaly uplatňovat mechatronické prvky. Byla zavedena elektronická kompenzace chyb polohování, měření rozměru obrobku pomocí měřících sond během obrábění i korekce programu pro dodržení rozměru a úchylek uvedených na výkrese [3].

### Stroje 6. generace

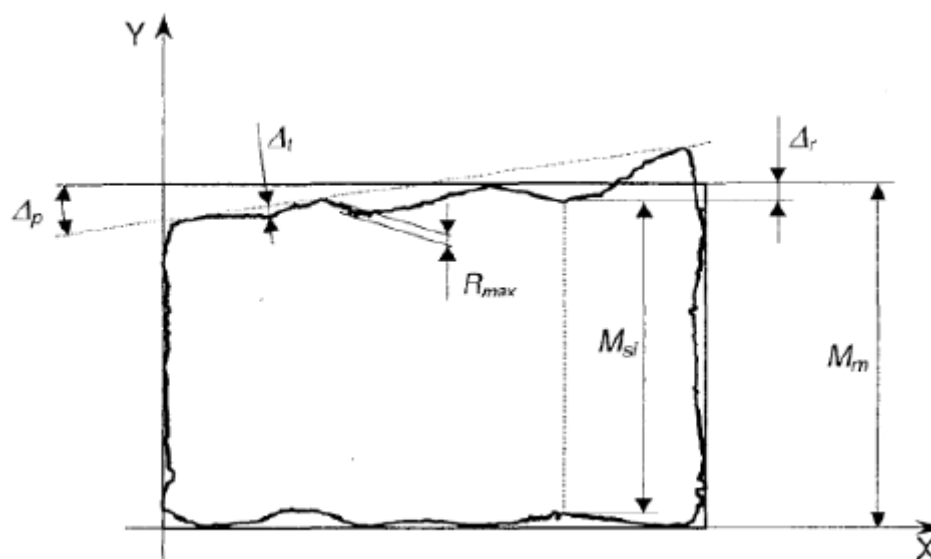
Tyto stroje jsou konstruovány s ohledem na zkušenosti z předcházejících vývojových stupňů. Hlavní změnou je snižování času na výměnu nástrojů a obrobků, vysokorychlostní i víceosé obrábění a ultra přesné obrábění (desetiny mikrometru). Dále jsou zde řazeny stroje, které jsou zhotoveny dle požadavků zákazníka [3].

## 2. Přesnost

### 2.1 Přesnost a nepřesnost

Pod pojmem přesnost obrábění rozumíme stupeň shody obrobene součástky s jejím geometrickým vzorem, který je určen výkresy. Čím je tato shoda větší, tím je přesnost obrábění vyšší. Na druhé straně příslušná odchylka představuje stupeň neshody obrobene součástky s příslušným geometrickým vzorem a nazýváme ji nepřesnost. [6]

Aby mohla libovolná součástka plnit správně svou funkci, na kterou je určena, může se její skutečný tvar a povrch odchylovat od tvaru a povrchu ideální součástky jen v určitých přípustných mezích, které byly zjištěny jako uspokojivé pro plnění požadované funkce. Určit a změřit nepřesnost každého bodu skutečného povrchu obrobene součástky je prakticky nemožné. Z tohoto důvodu byly zavedeny a definovány příslušné druhy odchylek - drsnost povrchu, odchylka tvaru, odchylka polohy a odchylky rozměrů od jejich jmenovitých hodnot (obr. 2). [6]



Obr. 2.1 Druhy odchylek skutečné povrchové plochy obrobku [6]

Odchylka tvaru  $\Delta t$  je určena rozdílem tvaru skutečné plochy vzhledem k ideálnímu tvaru součásti. Do odchylky tvaru se zahrnuje i vlnitost skutečné plochy způsobena hlavně kmitáním soustavy stroj-nástroj-obrobek. [6]

Odchylka polohy  $\Delta p$  je dána nepřesností vzájemného vztahu dvou prvků (ploch, přímek, bodů), a to na jedné nebo více součástkách navzájem. Její velikost závisí na způsobu obrábění, pracovních podmínkách, přesnosti a tuhosti obráběcího stroje, při několika součástkách působí i vliv montáže. [6]

Odchyłka rozměru  $\Delta f$  představuje rozměrovou nepřesnost skutečné plochy vzhledem k rozměru jmenovité plochy. Matematicky to je tedy rozdíl mezi skutečným rozměrem  $M_{si}$  a jmenovitým rozměrem  $M_m$ . [6]

$$\Delta f = M_{si} - M_m \quad (1.1)$$

Skutečný rozměr je rozměr naměřený na součástce a v každém bodě "i" skutečné plochy je jiný. Velkost odchyłky rozměru bude tedy v každém bodě skutečné plochy jiná. [6]

Při výrobě součástek není prakticky možné vyrobit součástky s absolutní přesností. Rozměry obrobené součástky se vždy liší od jmenovité hodnoty. Příslušná odchyłka závisí od dvou činitelů, z nichž nejdůležitějším je použitá výrobní operace. Některé dokončovací operace umožňují, aby se vzniklé odchyłky přibližovaly k jmenovitému rozměru velmi blízko, takže rozdíl mezi skutečným rozměrem a rozměrem předepsaným na výkresu je velmi malý. [6]

Celková nepřesnost obrábění je výsledkem celé řady faktorů. Každý z nich způsobuje vznik charakteristických prvotních nepřesností, z nichž nejdůležitější jsou:

- nepřesnosti způsobené pružnými deformacemi technologické soustavy stroj nástroji obrobek a od řezných sil a odporů,
- nepřesnosti vyvolané teplotními deformacemi technologické soustavy,
- nepřesnosti způsobené opotřebením ostří řezného nástroje,
- nepřesnosti řazení stroje a ustavení obrobku na stroji,
- nepřesnosti způsobené deformacemi obrobku od upínacích sil,
- nepřesnosti vyvolané geometrickými a kinematickými nepřesnostmi obráběcího stroje,
- nepřesnosti způsobené geometrickými nepřesnostmi řezného nástroje,
- nepřesnosti vyvolané vnitřním napětím v materiálu obrobku,
- nepřesnosti způsobené kmitáním technologické soustavy,
- nepřesnosti způsobené kolísáním vstupních rozměrových parametrů obrobku a nehomogenitou struktury materiálu.

Z uvedených bodů základních faktorů ovlivňujících přesnost obrábění vidíme, že rozhodující roli při zabezpečení přesnosti výroby sehrává obráběcí stroj a jeho přesnost. [6]

## **2.2 Přesnost obráběcích strojů**

### **2.2.1 Pracovní přesnost obráběcího stroje**

Pracovní přesnost obráběcího stroje je především ovlivňována: [4]

- a) kvalitou zpracování jeho funkčních částí a pečlivostí provedení dílčí i celkové montáže
- b) tuhostí celku i rozhodujících prvků jakými jsou pracovní vřeteno, ložiska, vodícídráhy
- c) přesností nastavení nástroje vzhledem k obrobku
- d) tepelnými deformacemi

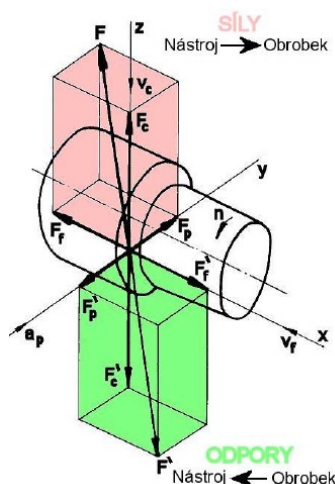
Pracovní přesnost při obrábění ovlivňuje ještě celá řada dalších činitelů, především však nástroj, obráběná součást a strategie obrábění. Všechny uvedené vlivy jsou zpravidla mimo dosah konstrukce obráběcího stroje. [4]

Obráběcí stroje se při nasazování do výrobního procesu podrobují přijímacím zkouškám geometrické i pracovní přesnosti, a to dle předepsaných norem řady ISO 9000 apod. Zkoušky geometrické přesnosti mohou ověřit přesnost montáže stroje a jeho celkového seřízení. Jsou vhodně kombinovány tak, aby se podle naměřených výsledků daly určit příčiny nedostatků ve zpracování důležitých částí obráběcího stroje. [4]

Zkoušky pracovní přesnosti mohou dodatečně odhalit nedostatky ve zpracování obráběcího stroje, zvláště pokud jde o vymezení vůlí a správnosti funkce ovládacích prvků za pracovních podmínek. Mimo nepřesnosti ve zpracování obráběcího stroje ovlivňuje jeho pracovní přesnost také kinematická nepřesnost, která pramení z úchylek v kinematické vazbě převodů mezi jednotlivými pohyby, jejichž složením vzniká výsledný pracovní pohyb. [4]

#### **– Vliv tuhosti na přesnost práce stroje**

Působením radiální složky síly  $F_p$ , kterou působí řezný nástroj na obrobek, např. při soustružení obr. 2.2, vznikají deformace částí stroje, nástroje obrobku, tj. mění se poloha funkce vůči obrobku. Toto hlavně ovlivňuje přesnost práce stroje. [4]



Obr. 2.2 Schéma působení sil na obrobek při soustružení [5]

Kdyby deformace byly konstantní, daly by se vymežit korekcí polohy nástroje. Deformace se ale ve skutečnosti mění např. z důvodu změny: [8]

- síly vlivem opotřebení nástroje
- přídatku na obrábění,
- obrobitelnosti po délce obrobku,
- polohy nástroje vůči částem stroje (výrazně u soustružení, hoblování, vyvrtávání).

Kromě uvedeného, tuhost ovlivňuje i: [8]

- funkce a trvanlivost částí stroje,
- klidný chod stroje.

Na přesnost práce stroje má také vliv kmitání. Kmitání obráběcího stroje je jev škodlivý, proto se mu snažíme vždy zabránit. Jeho nepříznivý vliv se projevuje tak, že: [8]

- zhoršuje kvalitu obráběné plochy, její přesnost tvaru a rozměrů,
- snižuje trvanlivost použitých nástrojů,
- znemožní použití hospodárných režimních podmínek, čímž ovlivní produktivitu,
- může vzniknout tzv. vibrační koroze.

U obráběcích strojů se vyskytují všechny druhy kmitání, tedy kmitání volné, vynucené, a samobuzené. Kmitání jako jev je jevem velmi složitým. Obráběcí stroj se skládá z množství hmotných pružných těles spolu navzájem svázaných a tyto se při kmitání navzájem ovlivňují [8].

## 2.2.2 Geometrická přesnost obráběcího stroje

Přesnost obráběcího stroje je dána geometrickou přesností, do které patří odchylky tvaru a polohy funkčních částí stroje (týkají se pouze jednoho prvku), dále pak vzájemnou polohou funkčních částí nebo ploch. Při měření geometrické přesnosti kontrolujeme [1]:

- přímost,
- rovnoběžnost,
- kolmost,
- rovinnost,
- souosost,
- čelní házení,
- obvodové házení,
- osovou vůli,
- osový pohyb.

Geometrická přesnost se na stroji měří za klidu nebo při volném chodu naprázdno. U některých druhů strojů (např. u vrtaček) se různé části stroje zatěžují, zejména tehdy, ověřuje-li se měřením tuhost stroje. Takzvanou funkční zkouškou se ověřují výsledky měření geometrické přesnosti. [1]

Přesnost se zjišťuje v tepelně ustáleném stavu stroje, který odpovídá jeho tepelnému stavu, při normálních pracovních podmínkách. Nejvhodnější teplota okolí při měřeních je  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Kolísání teploty pracovního prostředí během zkoušek nesmí překročit hodnoty uvedené v návodu na obsluhu stroje, nebo v příslušných normách pro přesnost konkrétního druhu a typu obráběcího stroje. Pokud tam tyto hodnoty nejsou definovány, pak kolísání teploty pracovního prostředí nesmí překročit pro stroje třídy přesnosti III., IV. a V.  $2^{\circ}\text{C}$ . Pro stroje tříd přesnosti I. a II. tato hodnota není definována. Pokud by výsledky měření mohlo v rozhodující míře ovlivnit teplo vznikající při práci stroje, je třeba tato měření provést po ukončení práce stroje při chodu naprázdno v souladu s údaji v normách pro přesnost stroje nebo s údaji v návodu na jeho obsluhu. Na teplotu pracovního prostředí má být stabilizovaná i teplota měřicích přístrojů. Podle potřeby se provede korekce vlivu teploty na výsledky měření. [6]

Zkoušky geometrické přesnosti začínají vždy pečlivým uložením stroje na základ tak, aby jeho výchozí (referenční) plocha byla ve vodorovné rovině. Tomuto úkonu se běžně říká uvedení stroje "do vodováhy". S touto referenční plochou jsou pak srovnávány polohy dalších funkčních ploch, osy vřeten, směry pohybů pracovních jednotek obráběcího stroje atd. Referenční plochy bývají zpravidla vodící plochy na



lůžkách soustruhů, frézek, hoblovek, brusek apod. Obráběcí stroj do vodorovné roviny se nastavuje pomocí nastavovacích klínů a šroubů. Poloha se kontroluje vodováhou, kterou je možné současně proměřit i přímost a rovinnost referenční plochy. Dovolené odchylky od vodorovnosti jsou přípustné v setinách mm na délku 1 m plochy a jsou uvedeny v příslušných normách pro přesnost příslušného obráběcího stroje, resp. v návodu k jeho obsluze. Pokud tyto údaje chybí, pak jsou přípustné tolerance maximálně 0,04 mm / 1 m pro stroje třídy I. a II. a maximálně 0,02 mm / 1 m pro stroje vyšších tříd přesnosti. Výsledkem těchto zkoušek je kromě nastavení referenční plochy do vodorovné polohy i zjištění charakteru naměřených odchylek od vodorovnosti. Dále ovlivňuje přesnost zejména zatížení stroje, zrychlení pohybujících se hmot a změna procesních sil. Negativním vlivem je samobuzené kmitání, které ovlivňuje velikost deformace stroje v závislosti na jeho dynamické poddajnosti [6].

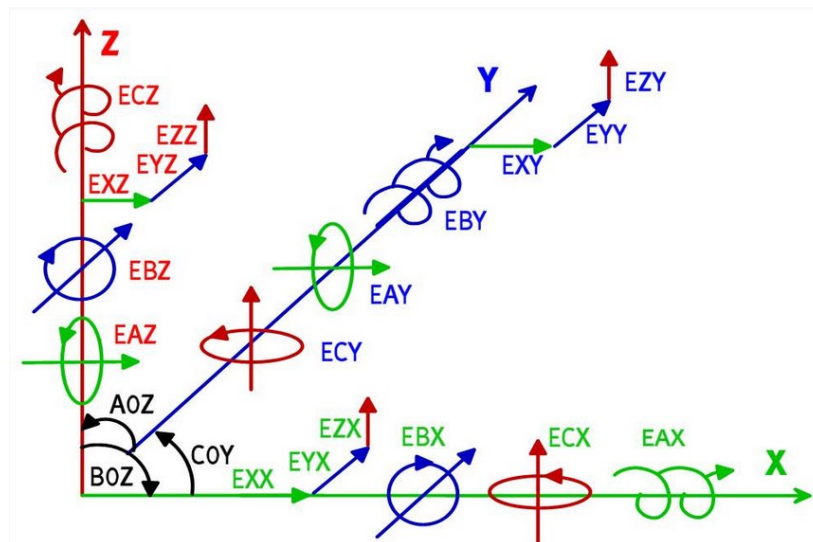
Chyby v obrábění jsou rozděleny mezi chyby náhodné a systematické. Náhodné chyby jsou zapříčiněny kombinací více faktorů, např. vůle v uložení, tření, nepřesnost měřicího zařízení atd. a mají Gaussovo normální rozdělení. Na druhé straně systematické chyby posouvají střed rozložení jedním nebo druhým směrem. Jsou způsobeny statickou poddajností, tepelnou roztažností konstrukce obráběcího stroje při obrábění atd. [9].

Chyby měření nesmí překročit 20% hodnoty naměřené odchylky pro stroje třídy I. a II., 25% pro stroje třídy III. a IV. a 30% pro stroje třídy přesnosti V. Chyba, která vznikne při zpracování číselných údajů měření, nesmí překročit 10% chyby měření. [6]

#### – **Odchylky pohybu lineární osy**

Jedná se o nechtěné lineární a úhlové pohyby součástí při pohybu podél nominální (přímkové) trajektorie (Obr. 2.3). U tříosého stroje, který má tři translační osy X, Y, Z, se může objevit, až 21 geometrických chyb tzn. 3 chyby pohybu lineárního polohování, 6 chyb pohybu přímosti, 9 úhlových chyb a 3 chyby kolmosti [10].

Chyby, které můžou při pohybu v lineární ose vznikat, jsou popsány pod níže zobrazeným obrázkem [10]:

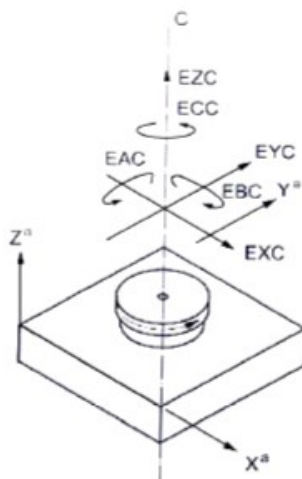


Obr. 2.3 Chyby vznikající při pohybu v lineární ose [10]

- EXX – přesnost najetí do polohy v ose X,
- EYY – přesnost najetí do polohy v ose Y,
- EZZ – přesnost najetí do polohy v ose Z,
- EYX – odchylka přímosti Y ve směru osy X,
- EZX – odchylka přímosti Z ve směru osy X,
- EXY – odchylka přímosti X ve směru osy Y,
- EZY – odchylka přímosti Z ve směru osy Y,
- EXZ – odchylka přímosti X ve směru osy Z,
- EYZ – odchylka přímosti Y ve směru osy Z,
- EAX – naklápění ve směru osy X („roll“),
- EBX – klopení ve směru osy X („pitch“),
- ECX – natáčení ve směru osy X („yaw“),
- EAY – naklápění ve směru osy Y („roll“),
- EBY – klopení ve směru osy Y („pitch“),
- ECY – natáčení ve směru osy Y („yaw“),
- EAZ – naklápění ve směru osy Z („roll“),
- EBZ – klopení ve směru osy Z („pitch“),
- ECZ – natáčení ve směru osy Z („yaw“),
- A0Z – kolmost v rovině Y-Z,
- B0Z – kolmost v rovině Z-X,
- C0Y – kolmost v rovině X-Y.

### – Odchylky pohybu rotační osy

Do této problematiky patří změny v poloze a orientaci os otáčení vzhledem k průměrné přímce osy jako funkce úhlu otáčení osy otáčení (Obr. 2.4). I u tohoto případu existuje šest odchylek. Rotační osa  $C$  tvoří pohybovou osu. Axiální pohyb tvoří translační odchylka  $E_{ZC}$ . Radiální chybu pohybu způsobuje odchylka  $E_{XC}$  a  $E_{YC}$ .  $E_{AC}$  a  $E_{BC}$  vyznačuje naklápění rotační osy  $C$  ve směru os  $x$  a  $y$ . Chybu v polohování způsobuje odchylka  $E_{CC}$  [10].



Obr. 2.4 Chyby vznikající při pohybu v rotační ose [12]

### – Volumetrické chyby

Velký význam má v dnešní době přesnost polohování měřené ne odděleně v jednotlivých osách, ale při jejich součinnosti v prostoru. Jedná se o tzv. volumetrickou přesnost, která je znázorněna na obr. 2.5 [11].

Volumetrické chyby zahrnují chyby polohové, rovinnosti, kolmosti a úhlové. Volumetrická přesnost je reprezentována mapou pozic a orientací chybových vektorů nástroje při pohybu v prostoru obráběcího stroje. Existují dva způsoby měření volumetrické přesnosti ve směru prostorové diagonály pracovního prostoru obráběcího centra [11]:

- souvislý způsob měření diagonály,
- sekvenční způsob měření diagonály – při měření tímto způsobem je nashromážděno 3x více dat a mohou být měřeny všechny složky celkové chyby.



Obr. 2.5 Měření volumetrické přesnosti [12]

Nejvyšším přínosem volumetrie je jednoznačně zmapování geometrických chyb u velkých obráběcích strojů a center. U těchto typů strojů se nejčastěji projevuje chyba kolmosti při pohybu v lineární ose. V případě pětiosých strojů se tato chyba nejvíce projevuje při pohybu rotační osy v závislosti na zvětšující se vzdálenosti. Maximálního přínosu numerické kompenzace lze dosáhnout právě při minimalizaci úhlových a rotačních chyb [11].

### 2.2.3 Měření geometrické přesnosti

#### – Ověření geometrie

Ověření geometrie obráběcího stroje lze provést pomocí přímé a nepřímé metody:

##### – Přímá metoda

Veškeré chyby os jsou vyhodnoceny zvlášť, bez ohledu na kinematický model stroje a pohyb ostatních os. Aby se určily všechny chyby, musí být měřicí systém umístěn do různých pozic. Příkladem takového zařízení je libela, využívající jako referenční zdroj gravitaci. Získané aproximované hodnoty chyb však nelze přímo extrapolovat do zbytku pracovního prostoru. Na principu přímé metody pracují CMM [14].

##### – Nepřímá metoda

Chyby jsou globálně kompenzovány po celém pracovním prostoru a k jejich analyzování dochází při víceosém pohybu stroje. Nepřímou metodou lze určit volumetrická přesnost stroje [14].

## – **Prostředky k určení geometrické přesnosti**

Vyskytující se chyby geometrické přesnosti bývají vyhodnocovány a jejich rozsah specifikován v souladu s funkčními požadavky na obráběcí stroj. Podle velikosti tolerančního pole těchto chyb pak lze určit třídu přesnosti stroje. K jejich určení se používají [15]:

- měřicí přístroje: snímače lineárního posunutí, interferometry, autokolimátor,
- referenční artefakty: zkušební trny, pravítka, úhelník, mikroskop s napnutým drátem, atd.,
- přírodní referenční zdroje: světelný paprsek, gravitace.

Pro měření je potřeba zajistit optimální podmínky. Obráběcí stroj musí být vhodně ustaven a vyrovnán, musí být kompletní (pokud není určeno výrobcem jinak) a okolní prostředí by se mělo podobat běžnému provozu. Měření se zpravidla provádí za klidu nebo při chodu naprázdno. Podmínky měření udává norma ČSN ISO 230 – 1 [15].

Obráběcí stroj lze proměřit různými způsoby. Samotná vhodnost měřicího přístroje se zvolí podle schopnosti identifikovat geometrické chyby, které chceme zjistit, podle přesnosti přístroje a doby měřicího procesu.

### **2.2.4 Současné metody měření geometrické přesnosti**

#### – **Laser tracker**

Laser tracker je přenosný měřicí systém (obr. 2.6) schopný stanovit polohu bodu ve sférickém souřadném systému. Přístroj vyvinula společnost ETALON AG. Hlavním komponentem přístroje je laserový interferometr a odražeč, který je umístěn na stroji nebo kontrolované části. Měřicí paprsek automaticky sleduje reflexní plochu odražeče a takto měří vzdálenost. Přístroj je potřeba postupně rozmístit do několika předdefinovaných poloh uvnitř pracovního prostoru stroje. V každé poloze stroj projede předem stanovenou dráhu, která byla navržena v příslušném softwaru. Zároveň nejsou potřeba žádné zásahy do hardwaru nebo nějaké přesné polohování a seřizování. Na závěr je vygenerována korekční mapa a tyto korekce jsou přímo uloženy do řídicí jednotky kalibrovaného obráběcího stroje. Hlavní výhodou je velmi přesné měření, dále lze měřit úchytky kolmosti os, pružné úchytky vodorovných ramen CMM, používají ve výrobním průmyslu ke kontrole velkých součástí, protože rozsah délky měření může být až 30m a poslední velkou výhodou je provedení prostorové kalibrace [10].



Obr. 2.6 Laser Tracer [10]

Popis obrázku: 1. přesná referenční koule  
2. měřící paprsek interferometru  
3. pevný čep

#### Interferometr

Často používaná jsou interferometrická zařízení využívající fyzikálních vlastností světla, které dokáží přímou metodou měření rozpoznat polohovací chyby stroje a chyby přímosti. Jejich měření je založeno na detekci fázových rozdílů, které se projeví při superpozici dvou a více vln ve výsledné intenzitě interferenčního pole. Laserový zdroj světla má výhodu mono chromatičnosti a koherence, a proto se s ním dá v praxi setkat nejčastěji. Díky jeho stabilitě lze proměřovat i velké vzdálenosti [15].

Na obrázku (obr. 2.7) je znázorněn princip interferometru. Zdroj světla je rozdělen do dvou paprsků. Jeden z nich je využit jako referenční paprsek a druhý je vyslán přes odrazku umístěnou v jisté vzdálenosti od přístroje. Po sloučení s referenčním paprskem dojde k vytvoření interference v důsledku rozdílných optických drah, z čehož se určí konečná odchylka [16].



Obr. 2.7 Princip Michelsonova interferometru [16]

– **Libela**

Jednoduchým příkladem měřicích přístrojů jsou mechanické a elektronické vodováhy. Libely využívají jako referenční prvek vektor tíhového zrychlení a jsou schopné měřit chyby rotačního pohybu kolem horizontálních os s velkým rozlišením a opakovatelností [14].

– **Ballbar systém**

Jako další příklad aktuálního měřicího systému je zařízení Ballbar. Tento způsob bude podrobně rozebrán v následující kapitole.

### 3. Systém Renishaw Ballbar QC20-W

Kalibrační systém Renishaw Ballbar QC20-W slouží spolu s příslušným softwarem k měření geometrických chyb u obráběcích CNC strojů a ke zjišťování nepřesností vyvolaných vlastním řídicím systémem nebo jednotkami servoregulace. Pracuje na principu testování odchylky kruhové interpolace. Je nástupce osvědčeného ballbaru QC10. Bezdrátová technologie řeší problémy se spojením mezi měřicí sondou a počítačem. Systém po diagnostice uspořádá naměřené jednotlivé chyby podle významu z hlediska celkové přesnosti stroje. Získaná data vyhodnocuje podle standardu ISO, ASME, JIS. Výhodou tohoto systému je rychlé a jednoduché změření stroje a odpadají problémy se spojovacím kabelem od sondy do PC [8].

Tab. 1 Technické parametry

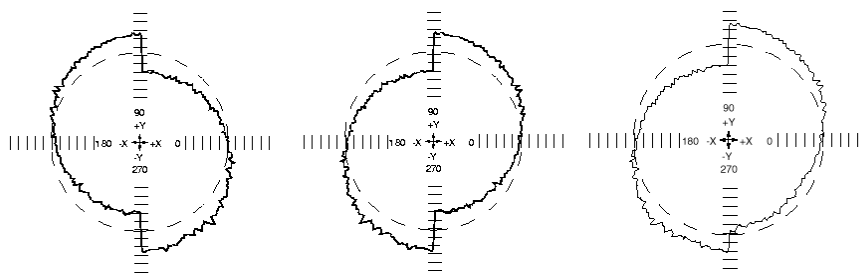
Rozlišení snímače	0,1 $\mu\text{m}$
Přesnost měření	$\pm (0,7 + 0,3\% L) \mu\text{m}$
Rozsah měření	$\pm 1,0 \text{ mm}$
Max. rychlost snímání	1000 Hz

#### 3.1 Chyby identifikovatelné dynamickým měřením

Chyby, které lze zjistit při měření pomocí systému Ballbar, se dají rozdělit do dvou základních skupin. První skupinu tvoří chyby, které vzniknou chybou stroje. Ve druhé skupině jsou zařazeny chyby, které vzniknou chybou testu. V následující kapitole budou tyto skupiny podrobně rozepsány.

##### 3.1.1 Grafy vzniklé chybou stroje

###### – Axiální vůle (mrtvý chod)



Obr. 3.1 Graf axiální vůle [13]

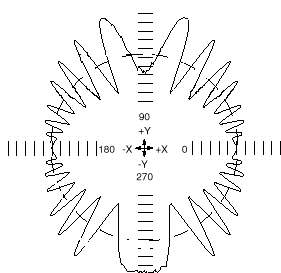
Na obr. 3.1 jsou zobrazeny grafy se zápornou (skok směrem ke středu) a kladnou (skok směrem ven) a asymetrickou axiální vůlí. Skoky jsou vykresleny pouze na ose Y. Posuv stroje obvykle neovlivňuje velikost skoku [13].



Příčinou může být vůle v pohonu osy stroje, která bývá obvykle zapříčiněna pohybem volného konce kuličkového šroubu nebo opotřebenou pohybovou maticí. Také v samotném vedení stroje se může vyskytnout vůle, která při změně směru pohybu stroje způsobuje prodlevu v pohybu, případně následkem nadměrného namáhání může docházet ke kroucení kuličkového šroubu. Důsledkem zmíněného jevu je tvoření malých plošek na obrobku, při kruhové interpolované dráze [13].

Řešením je odstranění vůlí v pohonu a ve vedení stroje. To někdy může dojít až k výměně opotřebených součástí. Lze také využít funkci kompenzace axiální vůle v řídicím systému stroje [13].

#### – Cyklická chyba



Obr. 3.2 Graf cyklické chyby [13]

Z grafu, který je zobrazen na obr. 3.2, lze vyčíst, že se vyskytují cyklické sinusové chyby s proměnlivou frekvencí i amplitudou. Příčin výskytu těchto chyb je několik: [13]

- Stoupání závitu kuličkového šroubu je nerovnoměrné, což místo rovnoměrného pohybu způsobuje cyklický pohyb osy.
- Odměřovací systém může být upnut excentricky.
- Kuličkový šroub může být uložen excentricky.
- Chybně namontovaný odměřovací systém (zejména při nepřímém způsobu odměřování).

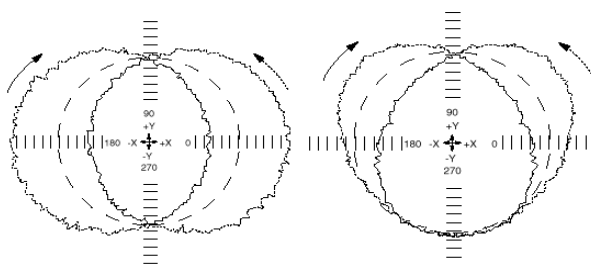
Pokud je příčinou kuličkový šroub, nebude graf směrem ovlivněn. Grafy pořízené ve směru nebo proti směru hodinových ručiček budou vypadat podobně, téměř shodně. Pokud se cyklická chyba vyskytne u vertikální osy pouze v jednom směru (při pohybu osy směrem nahoru nebo dolů), je pravděpodobné, že chyba je ve vyvažovacím mechanismu stroje [13].

Pokud je příčinou chybné vyvažování, bude graf orientací ovlivněn. Grafy s orientací ve směru a proti směru hodinových ručiček se tedy budou lišit. Obecně platí, že vyvažování způsobí cyklickou chybu v případě, kdy se stroj pohybuje svisle nahoru. Jestli se v grafu vyskytuje cyklická chyba pouze v polovině grafu, jedná se jasně o problém vyvažování [13].

Důsledkem jakéhokoli typu cyklické chyby je, že součásti obráběné strojem budou vykazovat rozměrové chyby [13].

Pro odstranění problému použijeme diagnostické analýzy, zobrazíme jednotlivé grafy s orientací ve směru a proti směru hodinových ručiček a zjistíme, zda je příčinou problém s kuličkovým šroubem nebo zda jde o problém vyvažování. Pokud je příčinou kuličkový šroub, provedeme jeho správné ustavení, obdobně budeme postupovat při špatně namontovaném odměřovacím systému. Jestli je vadný vyvažovací mechanismus stroje, provedeme jeho seřízení [13].

#### – Boční vůle – odchýlení



Obr. 3.4 Graf boční vůle [13]

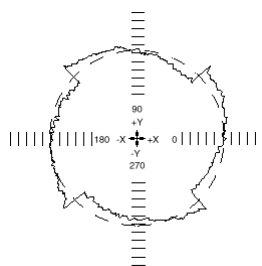
V obr. 3.4 je vlevo graf se symetrickou boční vůlí v ose Y, která způsobuje, že graf získaný pohybem ve směru hodinových ručiček je zobrazen uvnitř grafu získaného pohybem v opačném směru. O tom, který graf se zobrazí uvnitř, rozhodne kladná nebo záporná hodnota chyby boční vůle. Pravý graf zobrazuje asymetrickou boční vůli. Posuv stroje nemá na grafy s boční vůlí vliv, avšak tento typ grafu je ovlivněn směrem [13].

Hlavní příčinou boční vůle je vůle ve vedení stroje. Tato skutečnost způsobuje při reverzaci pravoúhlý pohyb os stroje. Tímto se boční vůle odlišuje od axiální vůle (mrtvého chodu), kde se také jedná o vůli, avšak ve směru osy. Z testu kruhovitosti systémem Ballbar je patrné, že axiální vůle je radiální chybou, kdežto boční vůle je tangenciální chybou [13].

Následkem zmíněných příčin může nastat to, že při obrábění bude stroj produkovat interpolované otvory nekruhového tvaru. U stroje se projeví obecné polohovací chyby na osách, které byly boční vůlí zasaženy [13].

Musí se zkontrolovat, zda diagnostikovaná chyba boční vůle nebyla způsobena změnou poloměru nebo změnou vychýlení. Pokud není problém vyřešen výše popsaným postupem, pak následuje seřízení nebo výměna vedení stroje a tím se odstraní veškeré vůle či odchýlení [13].

– **Záměna řídící a řízené role**



Obr. 3.3 Graf záměny řídící a řízené role [13]

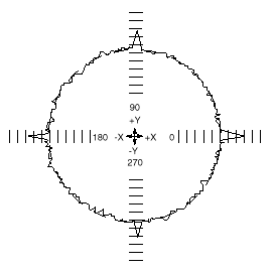
Graf vykazuje skoky po  $45^\circ$ . Velikost skoku narůstá se vzrůstajícím posuvem. Graf se zrcadlovým obrazem lze získat změnou směru. Skoky mohou směřovat dovnitř nebo ven [13].

Některé starší řídící systémy nemají schopnost provádět složitou interpolaci u více než jedné osy najednou. U takových systémů je kruh generován pohybem jedné osy (řídící osy) při konstantní hodnotě posuvu, zatímco u druhé osy (řízené) dochází ke změně posuvu, aby byl oblouk vygenerován. K vygenerování celého kruhu je nutné, aby si osy v úhlu  $45^\circ$  vyměnily role [13].

Důsledkem záměny řídící a řízené role je vytváření interpolovaných kruhů s nízkou kvalitou [13].

Pro odstranění problému je nutné zajistit synchronizaci snímání dat a nespustit dílčí program do té doby, než bude software Ballbar ke snímání dat připraven. Dále lze vyrovnat servosystémy os stroje a zajistit, aby záměna rolí byla co nejplynulejší [13].

– **Reverzační špičky**



Obr. 3.5 Graf reverzační špičky [13]

Graf, který je znázorněn na obr. 3.5, obsahuje krátké špičky začínající na osách. Velikost špiček se často mění v závislosti na velikosti posuvu [13].

Reverzační špičky se vyčíslují v mikrometrech a pro každou osu (X,Y) existují dvě hodnoty tzn. celkem čtyři [13].

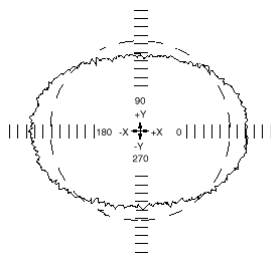
Dochází-li k pohybu osy v jednom směru, po němž má nastat obrát a pohyb v opačném směru, může v bodu obrátu namísto plynulé změny chodu dojít ke chvilkovému zastavení. Existuje několik možných příčin tohoto problému: [13]

- Pohon osy vyvinul v bodě obratu nepřiměřený krouticí moment, který při změně směru třecí síly způsobil chvilkové zablokování v bodě obratu.
- Doba odezvy servosystému stroje je u kompenzace axiální vůle (mrtvého chodu) nepřiměřená, tzn. že ke kompenzaci axiální vůle stroje nedojde včas a během prodlevy při vymezování axiální vůle dojde k zastavení osy.
- Odezva servosystému v bodě obratu není dostatečná. Výsledkem je krátká prodleva mezi zastavením pohybu osy v jednom směru a počátkem pohybu opačným směrem.

Důsledkem reverzačních špiček je, že kruhová interpolovaná dráha řezu zanechá malou plošku, za níž bude následovat zpětný krok [13].

Pokud je stroj vybaven řídicím systémem se schopností eliminovat špičky, použijte tuto kompenzaci k omezení účinků reverzačních špiček [13].

#### – Chyba měřítka



Obr. 3.6 Graf chyby měřítka [13]

Graf má oválný tvar s deformací podél osy v pozici  $0^\circ$  nebo  $90^\circ$ . Osa deformace není ovlivněna směrem snímání dat a velikost deformace v důsledku chyby měřítka nebývá obvykle ovlivněna posuvem stroje. Chyba měřítka je rozdíl v naměřených drahách os během testu. Například opisuje-li stroj kruh v rovině XY, měly by se osy X a Y přesouvat přesně o stejnou vzdálenost. Jestliže tomu tak není, systém stanoví rozdíl v pohybech a chybu měřítka [13].

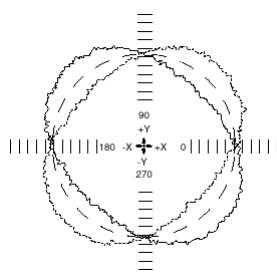
U jedné z os stroje dochází vzhledem k jiné ose k přeběhnutí nebo nerozbíhavosti. Možných příčin může být celá řada: [13]

- Pokud byly použity parametry kompenzace lineární chyby, je pravděpodobné, že jsou nesprávně nastaveny.
- Pásek měřítka může být u osy příliš napnutý nebo naopak povolený.
- Osa kuličkového šroubu může být chybná nebo dochází k přehřívání a následné chybě rozteče kuličkového šroubu.

Důsledkem je, že součásti obráběné strojem budou vykazovat rozměrové chyby.

Při zjištění této chyby je nutné zkontrolovat správné nastavení všech používaných hodnot kompenzace u lineární chyby, pak správné napnutí pásky měřítka osy, a také celkový stav a přímost lože [13].

## – Neshoda serva



Obr. 3.7 Graf neshody serva [13]

Graf má oválný tvar s deformací na diagonále v úhlu  $45^\circ$  či  $135^\circ$ . Osa, na níž je graf deformován, se změní, změní-li se pohyb ve směru hodinových ručiček na pohyb opačný [13].

Neshoda serva nastane v případě neshody zesílení polohové smyčky interpolujících os. Důsledkem je předstih jedné osy před druhou, což způsobuje oválný tvar grafu. Předbíhající osou je osa s vyšším zesílením [13].

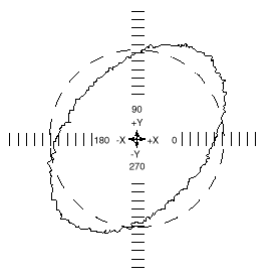
Důsledkem neshody serva je, že interpolované kruhy jsou oválné. Obecně platí, že se vzrůstajícím posuvem bude narůstat oválnost interpolovaného kruhu [13].

K odstranění problému lze dojít pomocí seřízení řídicího systému stroje vyrovnaním smyčkových zesílení servosystému os. Zvýšení zesílení u osy, která se zpožďuje, nebo snížení u osy, která se předbíhá [13].

Diagnostickou hodnotou je čas v milisekundách vyjadřující předbíhání jednoho serva osy stroje vůči druhému. Hodnota může být v závislosti na osách kladná i záporná a lze ji interpretovat následujícím způsobem: [13]

Testované roviny	Hodnota dodaná softwarem	Předbíhající osa
XY	+ve	Y předbíhá X
XY	-ve	X předbíhá Y
ZX	+ve	X předbíhá Z
ZX	-ve	Z předbíhá X
YZ	+ve	Z předbíhá Y
YZ	-ve	Y předbíhá Z

## – Kolmost



Obr. 3.8 Graf kolmosti [13]

Graf má oválný tvar nebo tvar brusného oříšku s deformací na diagonále v úhlu  $45^\circ$  či  $135^\circ$ . Osa deformace zůstává stejná při orientaci ve směru i proti směru hodinových ručiček. Velikost deformace není ovlivněna posuvem [13].

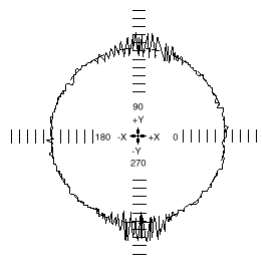
Hodnota vyčísľuje úhel mezi dvěma osami roviny testu, který je menší než  $90^\circ$ . V ideálním případě by měly být obě osy vůči sobě dokonale kolmé a výsledkem by byla chyba kolmosti s hodnotou nula. Jednotkami kolmosti jsou  $\mu\text{m}/\text{m}$ . K dispozici jsou i jiné jednotky (např. úhlové vteřiny, stupně,  $\mu\text{m}/\text{mm}$ , atd.) [13].

K chybě kolmosti dochází v situaci, kdy osy X a Y stroje nesvírají úhel  $90^\circ$  v poloze, v níž je test prováděn. Osy mohou být prohnuty místně nebo se může jednat o celkovou nevyrovnanost os stroje. Další možností je, že vedení stroje je příliš opotřebené a při pohybu v osách stroje vznikají určité vůle [13].

Díky chybě kolmosti je nemožnost dosáhnout kolmosti při obrábění čelních ploch.

U měření kolmosti je nutné opakovat test v různých místech a zjistit, zda se chyba kolmosti projevuje místně (pouze v určité části stroje) nebo zda ovlivňuje stroj jako celek. Jedná-li se o místní chybu, je potřeba používat při obrábění čelních ploch tu oblast stroje, která je chybou kolmosti nedotčena. Pokud je chybou kolmosti ovlivněn celý stroj, tak musíme provést nové vyrovnaní os stroje. Jestliže je opotřebené vedení stroje, bude pravděpodobné nutné je vyměnit [13].

## – Trhavý posuv



Obr. 3.9 Graf trhavého posuvu [13]

Na obr. 3.9 je krásně vidět, že v grafu jsou kolem osy zobrazeny vzrůstající poruchy. Použití pomalejších posuvů může při snímání dat způsobit rozšíření délky oblouku poruchy, avšak při vyšších hodnotách posuvů může porucha zcela vymizet.

Tím se graf trhavého posuvu odlišuje od grafu vibrací stroje. Hodnota chyby trhavého posuvu není diagnostickým softwarem vyčíslena [13].

Trhavý posuv je zapříčiněn blokováním u jedné z os stroje v okamžiku poklesu hodnoty posuvu pod určitou rychlost. Na obr. 7 dochází k zablokování na ose Y. Příčin může být několik: [13]

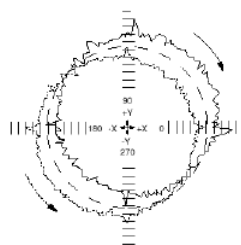
- Pohon u dané osy má při malé rychlosti nedostatečný výkon. Pohyb v ose pak nedokáže překonat tření a důsledkem je chvilkové zablokování. Za takových okolností se projevy trhavého posuvu zhoršují při pomalejším posuvu.
- Valivé prvky ve vedení stroje jsou poškozeny a zabraňují plynulému pohybu podél os. Výsledkem je blokování pohybu v určitých místech.
- Kluzná vedení stroje mohou být příliš stará a opotřebená, takže se na nich film maziva při pomalých rychlostech nedokáže udržet. Nedostatek maziva pak způsobuje blokování.

Důsledkem trhavého posuvu je nízká kvalita povrchu obrobku, právě při nízkých hodnotách posuvu. Dráha řezu není plynulá, a vykazuje bodová zploštění, za nimiž následují drobné skoky, způsobené chvilkovým zablokováním a poskočením v okamžiku odblokování [13].

Při snaze odstranit tuto chybu je potřeba zkontrolovat, zda kluzná vedení nejsou opotřebovaná. Pokud je zjištěno značné opotřebení, musí být vedení vyměněny. Vodicí plochy lze podle potřeby namazat. Pokud je problém způsoben vinou nedostatečného výkonu při nízkých rychlostech, musí se provést potřebné seřízení předpětí vedení a nastavení výkonu stroje. Počítá-li se s výskytem trhavého posuvu, je vhodné používat stroj pro obrábění nahrubo. Vyšší hodnoty posuvu s největší pravděpodobností zajistí kvalitnější povrch [13].

### 3.1.2 Grafy vzniklé chybou testu

- **Posunutí středu**



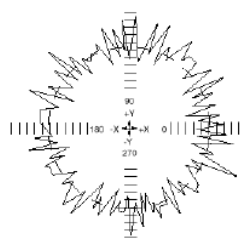
Obr. 3.10 Graf posunutí středu [13]

Z grafu je patrný rozdíl ve vystředění mezi stopou získanou ve směru a proti směru hodinových ručiček – stopy jsou vychýleny [13].

Jednou z příčin může být delší prodleva mezi běhy ve směru a proti směru hodinových ručiček. Teplota testovaného stroje se během této doby zcela jistě změní a u stroje dojde ke změnám rozměru. Další možností je nezablokované vřeteno stroje a v průběhu snímání dat se otáčí. Také mohlo dojít k uvolnění středového držáku [13].

Jestliže byla příčinou dlouhá prodleva mezi běhy ve směru a proti směru hodinových ručiček, provedeme nové snímání dat v obou směrech bez delší prodlevy mezi měřeními. Mohlo také dojít k uvolnění některé součásti systému Ballbar, zkontrolujeme dotažení všech příslušných spojů [13].

#### – Přerušovaný graf



Obr. 3.11 Přerušovaný graf [13]

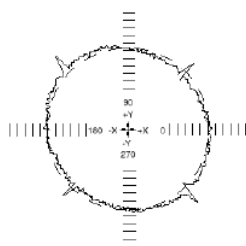
Na grafu zobrazeném na obr. 3.11 jsou patrné náhodně situované špičky, přerušení a nadměrné poruchy. Určitou hodnotu šumu však lze očekávat u všech grafů [13].

Příčinou může být, že kabel nebo zástrčka systému Ballbar mohou být ve spoji uvolněny, což způsobuje problémy s přenosem získaných dat do softwaru. Další příčinou může být trhavý posuv stroje, nebo vysoké vibrace stroje. Možnou příčinou může být i spouštění softwaru Ballbar na pomalém počítači [13].

Vyskytne-li se tento graf, bude diagnostika stroje prováděná softwarem s největší pravděpodobností, nesprávná, nebo nepřesná [13].

Při odstranění tohoto problému musíme zkontrolovat dotažení všech příslušných spojů systému, dále zkontrolovat kabel a zástrčku systému, jestli jsou dobře propojeny a zda nejsou poškozeny [13].

#### – Pootočený graf



Obr. 3.12 Pootočený graf [13]



U grafu jsou všechny reverzační rozměry osy pootočený kolem středu grafu, jak lze vidět na obr. 3.12.

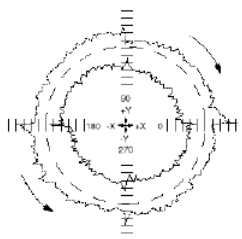
Pootočené grafy se vyskytují v situacích, kdy snímání dat softwarem Ballbar není synchronizováno s pohybem obráběcího nástroje, z něhož jsou data získávána. Příčin může být několik: [13]

- Vinou nesprávného dílčího programu může u stroje dojít k zahájení snímání dat ještě předtím, než bude software Ballbar ke snímání dat připraven.
- Středový držák může být velmi špatně vystředěn, a to může způsobit neočekávané vychýlení systému Ballbar mimo pracovní prostor, což software vyhodnotí chybně a bude pokládat za koncový impuls.

Vygenerované grafy mají nízkou kvalitu a nejasnou orientaci, takže stanovení diagnostiky chyby je obtížné. Diagnostika chyby stroje uskutečněná diagnostickým softwarem bude pravděpodobně nepřesná nebo nesprávná [13].

Pro odstranění této chyby je nutné zkontrolovat dílčí program, tzn. zkontrolovat správnost všech zadaných hodnot. Také je vhodné si zkontrolovat, že dílčí program nespouštíme příliš brzy a pokud je podezření, že je vystředění středového držáku nepřesné, je lepší ho znovu vystředit [13].

#### – **Změna poloměru**



Obr. 3.13 Pootočený graf [13]

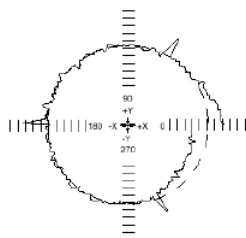
V obr. 3.13 graf vykazuje značné rozdíly v poloměru při snímání ve směru a proti směru hodinových ručiček [13].

V době mezi snímáním ve směru a proti směru hodinových ručiček došlo ke změně teploty systému Ballbar nebo testovaného stroje. Tato teplotní změna způsobila změnu délky systému Ballbar, a tedy i rozdíl v poloměrech mezi oběma měřeními. Mohla vzniknout delší prodleva mezi měřeními ve směru a proti směru hodinových ručiček, díky které se změnila podmínka hlavně teplota. V některých případech může být tento problém způsoben boční vůlí na obou osách testu. Dále také mohlo dojít k uvolnění systému Ballbar [13].

Prvním krokem je nutné odstranit vliv změny teplot na systém Ballbar nebo na stroj, k nimž došlo mezi jednotlivými běhy měření. V dalším kroku se musí zkrátit

prodleva mezi snímáním dat v obou směrech. Je také vhodné zkontrolovat upevnění jednotlivých součástí systému [13].

– **Spirálová chyba**



Obr. 3.14 Pootočený graf [13]

Jak lze vidět na obr. 3.14 spirálový graf může mít stoupání směrem dovnitř nebo ven, takže graf selhává při napojení na počáteční nebo koncovou pozici dat [13].

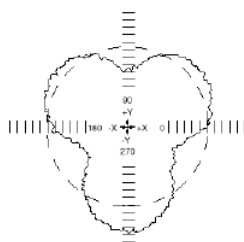
Pokud je graf charakterizován odchylkou dráhy, budou příčiny následující: [13]

- Příčinou je obvykle teplotní změna systému Ballbar v průběhu přejezdu. Tyto teplotní výkyvy mohou u systému Ballbar způsobit změnu délky.
- Mohlo dojít k uvolnění středového držáku a následnému vybočení ballbaru z pracovního rozsahu.
- Mohlo dojít k odemčení vřetena stroje a následné rotaci.
- Došlo pravděpodobně k uvolnění kuliček ballbaru.
- Je možné, že program součásti neodpovídá nastavení softwaru. Zkontrolujte nastavení oblouku snímání a oblouku přejezdu.

Díky výše uvedeným bodům jsou grafy zavádějící a nemusí být správné vyloženy. Automatické výpočty jako jsou radiální odchylka a odchylka kruhovitosti budou nesprávné [13].

Pokud se jedná o příčiny teplotních výkyvů, musí se zjistit přítomnost všech zdrojů tepla či náhlých průvanů, které by mohly ovlivnit test vinou změny teploty systému Ballbar. Je-li příčinou rušivý vliv kabelu, musíme zajistit, aby kabel v průběhu snímání dat nepřekážel v prostoru systému Ballbar ani misky, nezadhrával o stroj a ani se neovíjel těsně kolem středového držáku. Také musíme zkontrolovat, jestli nedošlo k uvolnění jakékoli části systému Ballbar [13].

### – Trojlaločný graf



Obr. 3.15 Pootočený graf [13]

V celkovém zobrazení grafu jsou zřetelné tři laloky. Velikost a orientace těchto laloků se mohou měnit mezi sousedícími směry snímání ve směru a proti směru hodinových ručiček. Trojlaločný graf lze odlišit od grafu chyby přímosti podle ostrého přechodu mezi laloky. Grafy přímosti zobrazují plynulejší přechod [13].

Chyba je způsobena nedostatečnou přímostí vedení stroje. Vedení může být v některém místě prohnuto nebo se může jednat o jeho celkovou nevyrovnanost. Příčinou může být opotřebení vedení, havárie, v jejímž důsledku došlo k poškození vedení stroje či ztrátě souososti, nebo mohou být příčinou nedostatečné základy způsobující prohnutí celého stroje [13].

Pokud je miska sondy znečištěná, nebo jsou spoje sondy špatně ukotvené, může to mít za následek chybu testu. Pokud se tento problém zjistí, je potřeba chyby odstranit a test provést znovu. Bude-li i nadále vycházet typ grafu vypovídající o přímosti, tak se u stroje skutečně jedná o chybu přímosti. Pak nezbývá nic jiného, než provést potřebné seřízení, opravu nebo výměnu vedení stroje [13].

## 4. Měření daného stroje systémem Ballbar

### 4.1 Použitý stroj

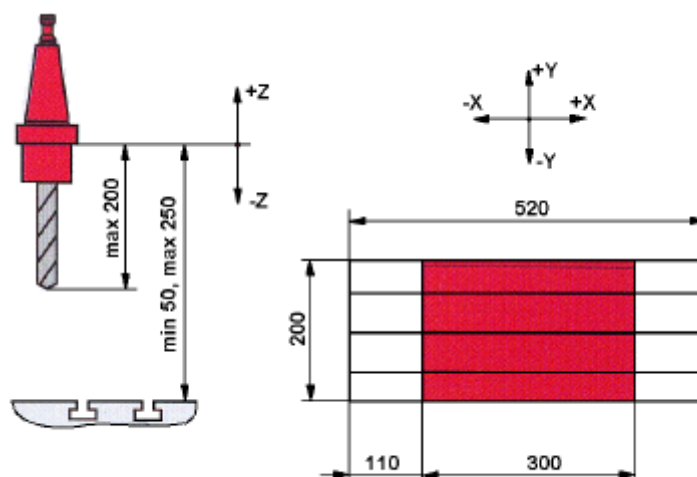
Měření proběhlo v pracovním prostoru tříosé CNC frézky EMCO PC Mill 155 (obr. 4.1) v nezátíženém stavu. Tento obráběcí stroj je majetkem katedry 346, proto byl zvolen pro toto měření. V CNC frézce je zabudován řídicí systém SINUMERIK 850D. Parametry obráběcího stroje jsou uvedeny v tab. 2.



Obr. 4.1 CNC frézka PC MILL 155

Tab. 2 Technická data CNC frézky PC MILL 155 [17]

Popis	Hodnota
Pracovní rozsah [mm] (posuv v osách X,Y,Z – obr. 4.2)	300,200,300
Rychloposuv [ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	7,5
Rozměry upínacího stolu [mm]	520 x 180
Výkon hlavního elektromotoru [kW]	4
Otáčky vřetene [ $\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$ ]	150 – 10 000
Počet poloh revolverové nástrojové hlavy [–]	10



Obr. 4.2 Pracovní prostor frézky PC MILL 155 [17]

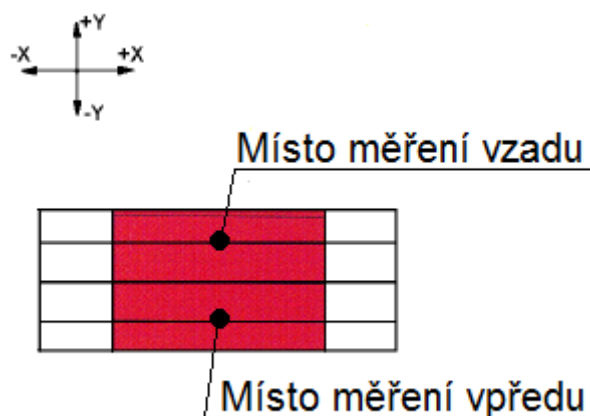
## 4.2 Popis měření

Pro určení přesnosti během kruhové interpolace obráběcího stroje, byl zvolen měřicí přístroj Renishaw Ballbar 20, který je i s příslušenstvím zobrazen na obr. 4.3. Ten spolupracuje s vlastním softwarem Renishaw Ballbar QC 20-W, který je schopen také vyhodnotit z naměřených dat volumetrickou analýzu zjištěním odchylky kulovitosti. Kulovitost je definována jako rozdíl mezi největším a nejmenším průměrem zaznamenaným ballbarem během 3 oblouků snímání dat v rovinách XY, YZ a ZX poté, co z dat byly odstraněny všechny středové odchylky. Čím je hodnota větší, tím jsou parametry stroje horší.



Obr. 4.3 Měřicí přístroj Ballbar s příslušenstvím

V experimentu bylo použito nejkratší možné měřicí rameno, které bylo k dispozici tj. 100mm. Bohužel po zkušebním měření bylo zjištěno, že kvůli malému pracovnímu rozsahu není možné měření celé kružnice tj.  $360^\circ$ . K tomu by byl zapotřebí měřicí přístroj o délce 50mm, který bohužel nebyl k dispozici. Proto bylo nutné přistoupit k jiné variantě a to že měření bude probíhat pouze v částečném oblouku tj.  $220^\circ$  v rovinách XY, ZX a v rovině ZY dokonce v rozsahu  $120^\circ$ . Také z těchto důvodů muselo být provedeno měření v polovině osy  $x'$  a v záporné oblasti osy  $y'$  (na obr. 4.4 zobrazeno jako místo měření vpředu pracovního stolu) a další místem měření byla zvolena oblast v polovině osy  $x'$  ale v kladné oblasti osy  $y'$  (na obr. 4.4 zobrazeno jako místo měření vzadu pracovního stolu). Po naměření byla všechna zaznamenaná data pečlivě uložena a vyhodnocena. Problematice vyhodnocení výsledků měření je věnována pozornost v kapitole 5.



Obr. 4.4 Znázorněná místa měření

### 4.3 Příprava k testování

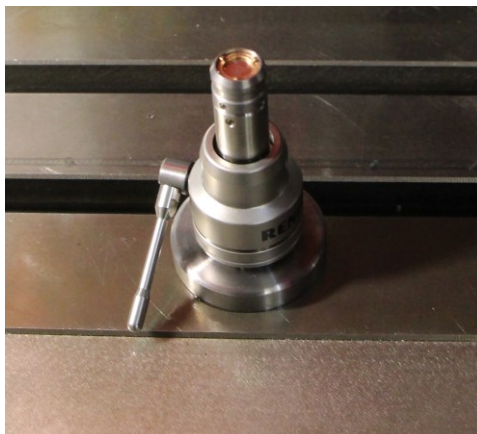
Aby byla zajištěna tepelná stabilita, bylo vhodné umístit Ballbar několik hodin předem do zkušební místnosti. Kvůli zahřátí vřetena a pracovního stolu se rozběhl obráběcí stroj alespoň hodinu před vlastním měřením. Teplota stroje se stanovila pro aktuální experiment na  $20,0^\circ\text{C}$ . Během testování nedocházelo ke kontrole pracovní teploty, a proto zde mohla vznikat nejistota měření z důvodu nepřesné pracovní teploty. To má za následek neideální kompenzaci teplotní roztažnosti stroje měřicím softwarem.



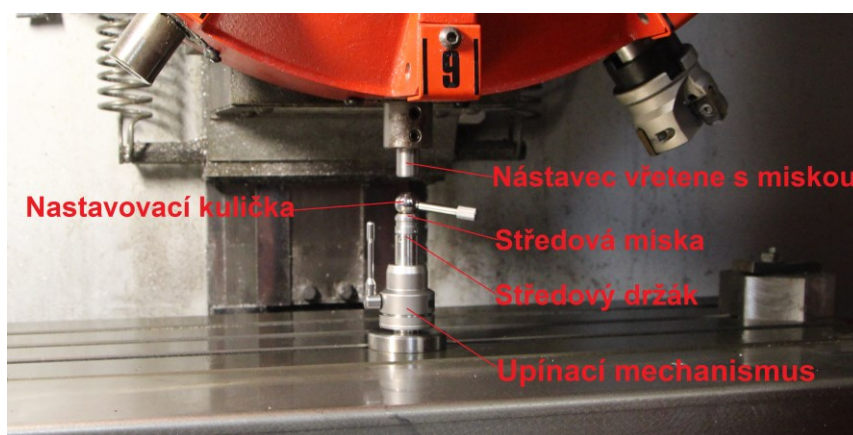
#### 4.4 Nastavení měření

Testování na měřeném stroji proběhlo ve všech rovinách pracovního prostoru u tříosého obráběcího stroje, tj. XY, YZ a ZX, přičemž směry os souřadného systému ballbaru vycházely z orientace pohybu nástroje.

V prvním kroku bylo nutné systém Ballbar sestavit dohromady a nastavit připojení k počítači pomocí Bluetooth. Poté následovalo umístění upínacího mechanismu se středovým držákem (jeho detail znázorněn na obr. 4.5) do místa měření vpředu pracovního stolu a upnutí nástavce vřetene s miskou do uzamknutého vřetene. Na uvolněný upínací mechanismus se středovým držákem se vložila do středové misky, která je magnetická, nastavovací kulička. Následovalo přijetí do blízkosti nastavovací kuličky s nástavcem vřetene s miskou, který je také magnetický. Následným pohybem lože se dodatečně upravila poloha kuličky tak, aby se přichytila k oběma miskám. Na obr. 4.6 lze vidět poloha těsně před přichycením nastavovací kuličky k miskám.



Obr. 4.5 Detail upínacího mechanismu se středovým držákem a středovou miskou

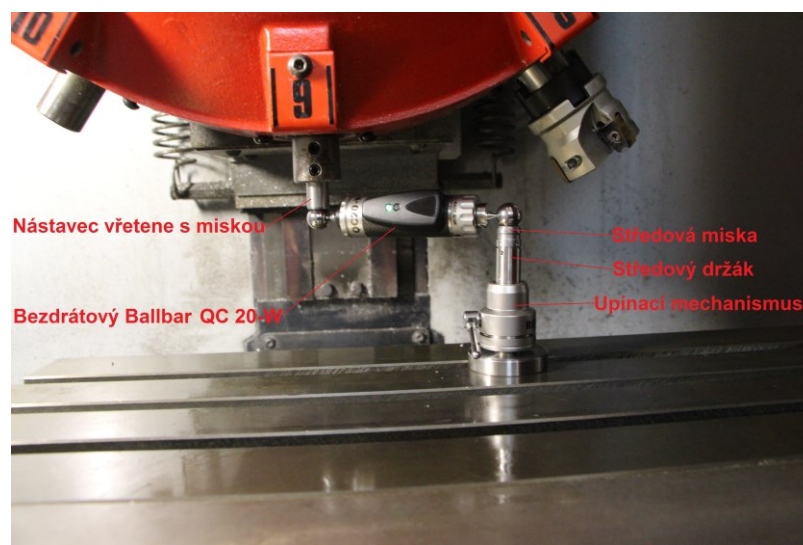


Obr. 4.6 Nastavení nulového bodu měření

V této fázi se zajistil upínací mechanismus k pracovnímu stolu, aby se nemohl pohnout a v řídicím systému obráběcího stroje se tato aktuální poloha zvolila jako počátek os souřadného systému měření (nulový bod měření G54 až G57). Po odjetí

nástavce vřetene s miskou se nastavovací kulička odebrala ze středové misky držáku. Tímto úkonem byla mechanická část přípravy prozatím hotova.

Druhým krokem bylo nastavení měření a vytvoření měřicího NC programu. To bylo provedeno ve správci programu, ve kterém lze nastavit parametry měření: typ stroje, rovina, posuv, poloměr testu, aplikace kalibrování a specifikace průběhu zkoušky. Pro jednotlivé roviny se volí úhel oblouku snímání dat. Jak už bylo dříve zmíněno, v našem případě se nedalo provést měření na celém kruhu tj.  $360^\circ$ , protože pracovní stůl stroje má malý rozsah, proto bylo provedeno měření v rovinách XY a ZX pouze v částečném oblouku v rozsahu  $220^\circ$  a v rovině ZY dokonce pouze v rozsahu  $120^\circ$  s úhlovým přejezdem před a za obloukem  $2^\circ$ . Tento přejezd slouží k přechodu nulové hodnoty posuvu až na hodnotu požadovanou a naopak. Díky tomu se předchází ovlivnění naměřených výsledků rychlou změnou posuvu při rozjezdu a dojezdu. Pro obloukovou dráhu  $360^\circ$  je zvolen přejezd  $45^\circ$ . Snímání se provádělo v obou směrech běhu tzn. ve směru (CW) i proti směru hodinových ručiček (CCW). Po těchto krocích se mohl vygenerovat měřicí NC program. Za použití generátoru programu se automaticky vytvořil, podle zadaných parametrů a zvoleného řídicího systému, který je ve stroji (v našem případě je to SINUMERIK 840D), dílčí měřicí program. Tento vzniklý NC program se nahrál do stroje. V závěru nastavení se přešlo do nastaveného startovacího bodu testu a do středové misky a nástavce vřetene s miskou se upnula měřicí sonda. Na obr. 4.7 lze vidět startovací bod při měření v rovině XY a ZX v místě měření vzadu a na obr. 4.8 je zobrazen startovací bod při měření v rovině ZY v místě měření vzadu. Startovací body v místě měření vpředu byly stejné.



Obr. 4.7 Startovací bod při měření v rovině XY a ZX vzadu





Obr. 4.8 Startovací bod při měření v rovině ZY vzadu

Ještě před vložením Ballbaru do stroje by měla proběhnout jeho kalibrace pomocí kalibrátoru, který je součástí vybavení systému. V našem případě nebylo kalibrování nutné, protože při přiložení zapnutého Ballbaru na kalibrační desku software naměřil hodnotu 100,0011mm, která je předepsaná na kalibrační desce pro délku 100mm (obr. 4.9).



Obr. 4.9 Stanovené kalibrační hodnoty pro měřící délky

Také bylo před řádným spuštěním měření vhodné pustit zkušební měření naprázdno bez Ballbaru, aby se případně zjistilo, zda není nějaká chyba v programu, díky které by se mohl přístroj nepředvídaně poškodit nárazem do lože stroje nebo jiného předmětu.

Po spuštění měření se začala zaznamenávat oblouková dráha vykonaná ballbarem kolem středového držáku. Při průběhu měření se vyskytuje tzv. přídavný lineární pohyb 1,5 mm, který se používá jako startovní impuls ke spuštění softwaru. Jakmile program zjistí, že převáděcí prvek byl posunut do pracovní polohy snímání a Ballbar začne opisovat první oblouk, spustí se zaznamenávání dat. Na konci prvního

oblouku se převáděcí prvek zase vysune z pracovní polohy. Snímání se přeruší, protože mezi běhy je obsažen programový stop M0. Díky tomu přístroj čeká na povel ze stroje a po opětovném povelu se průběh měření opakuje v opačném směru. Po ukončení měření se nasnímaná dráha přístroje zobrazí v programu do grafu. Tyto zjištěné grafy a data se pečlivě uloží pro další vyhodnocení. Měřicí přístroj, byl opět rozebrán a uložen do přepravného kufru s veškerým svým příslušenstvím. Obráběcí stroj se navrátil do původního stavu a vypnul se.

#### 4.5 Postup měření

Testování probíhalo za různých hodnot posuvu ve dvou místech pracovního stolu. První místo měření bylo zvoleno vpředu pracovního stolu a měření proběhlo v každé rovině pro každou hodnotu posuvu jednou. Stejný postup se opakoval ve druhém místě měření, které bylo zvoleno vzadu na pracovním stole. Přehled měřících podmínek ve všech rovinách je zobrazen v tab. 3 a 4 a celkem bylo provedeno 36 korektních měření.

Tab. 3 Měřící podmínky pro měření vpředu na pracovním stole

Měřené roviny XY, ZX, (220°) a YZ (120°)					
$f_1$ [mm/min]	$f_2$ [mm/min]	$f_3$ [mm/min]	$f_4$ [mm/min]	$f_5$ [mm/min]	$f_6$ [mm/min]
250	500	750	1000	1250	1500

Tab. 4 Měřící podmínky pro měření vzadu na pracovním stole

Měřené roviny XY, ZX, (220°) a YZ (120°)					
$f_1$ [mm/min]	$f_2$ [mm/min]	$f_3$ [mm/min]	$f_4$ [mm/min]	$f_5$ [mm/min]	$f_6$ [mm/min]
250	500	750	1000	1250	1500

## 5. Vyhodnocení měření

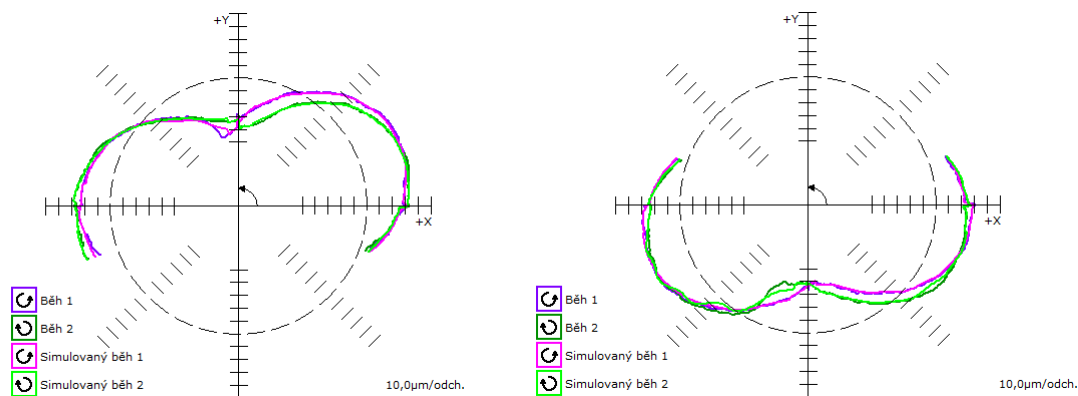
Vykreslené grafy obousměrné kruhové odchylky a diagnostické tabulky všech měření jsou uvedeny v příloze. Protože není možné popsat všech 36 měření, bude ve vyhodnocení popsáno pouze jedno měření v každé rovině vybraným posuvem. Měřicí posuv byl zvolen 500mm/min a ten bude použit ve všech vyhodnoceních. Jako první je zpracováno vyhodnocení pro jednotlivé roviny měření. Ty jsou zhodnoceny pro obě místa měření, tzn. vpředu i vzadu. V dalším bodě je zhodnocen vliv měřicího posuvu na obousměrnou odchylku kruhovitosti. Měření obousměrné odchylky kruhovitosti bylo provedeno metodou kruhové interpolace podle normy ČSN ISO 230-4.

### 5.1 Vyhodnocení měření v rovině XY v obou místech měření

#### 5.1.1 Zhodnocení naměřených diagnostických chyb

##### – Zhodnocení naměřených diagnostických chyb v měřeném místě vpředu

Průběh měření je znázorněn na obr. 5.1 vlevo. Z diagnostiky veškerých chyb je procentuálně nejvíce zastoupená kolmost, která má 37% zastoupení z celkové chyby kruhovitosti. Jednou z příčin může být opotřebení vedení stroje, díky kterému mohou vznikat v osách stroje určité vůle, nebo osy X a Y nesvírají úhel 90°. Při výskytu této chyby není možné dosáhnout ideální kolmosti při obrábění čelních ploch. Další výraznou chybou je mrtvý chod Y neboli axiální vůle v ose Y. Tato chyba má 15% zastoupení. Ve vzniklém grafu lze vidět, že se jedná o axiální vůli zápornou. Příčinou může být vůle ve vedení stroje, díky které vznikne v grafu skok směrem ke středu při změně směru pohybu. Třetí největší chybou je neshoda serva, které má zastoupení 9%. Z její záporné hodnoty zjistíme, že osa X předbíhá osu Y. Důsledkem je oválnost interpolovaného kruhu. V našem případě půlkruhu. V pořadí čtvrtou chybou je příčná neboli boční vůle v zastoupení 9%. Vygenerované hodnoty jsou různé, proto se jedná o boční vůli asymetrickou. Tato chyba vznikne, pokud je ve vedení stroje vůle a důsledkem jsou nekruhové otvory při výrobě kruhovou interpolací. Poslední nejdůležitější chybou je zpoždění serva v Y s 9 % zastoupením. Jedná se o tzv. reverzační špičky a jejich příčinou vzniku může být problém se servosystémem nebo pohonem osy. Důsledkem může být zanechání malé plošky na povrchu kruhově interpolované dráhy. Následuje příčná vůle osy X (7%), pak amplituda cyklické chyby osy Y (4%), mrtvý chod osy X (4%), zpoždění serva v ose X (4%) a poslední chybou je amplituda cyklické chyby osy X (2%). Příčinou vzniku cyklické chyby může být nerovnoměrné stoupání závitu kuličkového šroubu nebo jeho uložení může být excentrické. Důsledkem jsou rozměrové chyby obrobené součásti.



Obr. 5.1 Vykreslený graf roviny XY v měřeném místě vpředu (vlevo) a vzadu (vpravo)

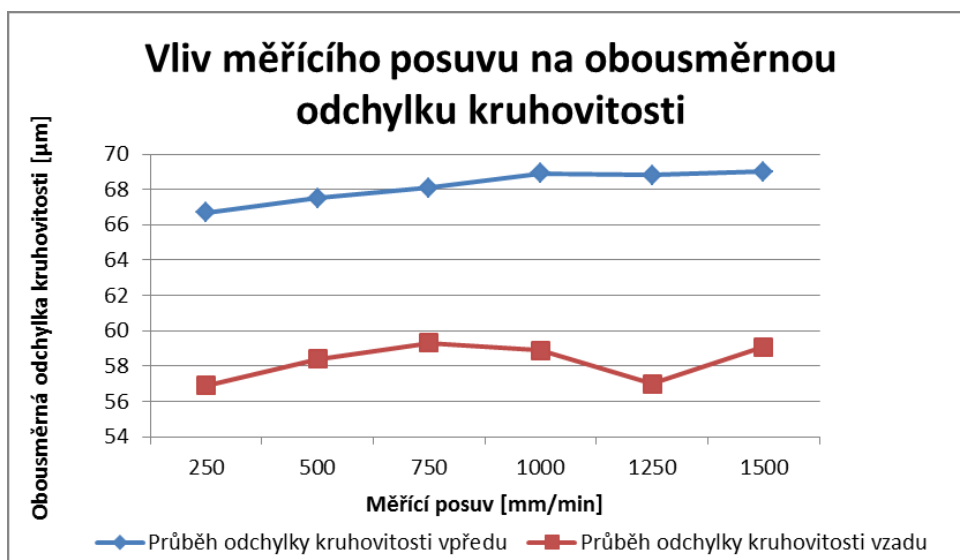
#### – Zhodnocení naměřených diagnostických chyb v měřeném místě vzadu

Průběh měření je znázorněn na obr. 5.1 vpravo. Nejvíce zastoupenou chybou (22%) z celkové chyby kruhovitosti je příčná vůle v ose Y. Z naměřených hodnot ale i z grafu lze usoudit, že se jedná o vůli asymetrickou. Tato chyba se objeví, je-li ve vedení stroje nějaká vůle. Následkem jsou nekruhové otvory při výrobě kruhovou interpolací. Druhou nejvýraznější chybou je kolmost (18%), která vznikne díky opotřebením vedení stroje a následnou vůlí v osách XY. Následkem této chyby se nedá dosáhnout ideální kolmosti při obrábění čelních ploch. Další výraznou chybou je amplituda cyklické chyby osy Y zastoupená 13%. Příčinou vzniku cyklické chyby může být nerovnoměrné stoupání závitu kuličkového šroubu nebo jeho uložení může být excentrické. Pokud se vyskytne tato chyba, objeví se na součásti po obrobení rozměrové chyby. Čtvrtou chybou je příčná vůle v ose Y (13%) a po ní následuje mrtvý chod neboli axiální vůle osy Y (12%). Jedná se o axiální vůli zápornou, protože směr skoku je ke středu, jak lze vidět v grafu. Příčinou může být vůle ve vedení stroje nebo také v pohonu osy. Následkem této chyby je vznik plošky při obrábění kruhovou interpolací. Šestou chybou je mrtvý chod v ose X (7%), pak amplituda cyklické chyby v ose X (5%), dále zpoždění serva neboli reverzační špičky v ose Y (4%), neshoda serva (3%) a jako poslední je zpoždění serva neboli reverzační špičky v ose X (3%).

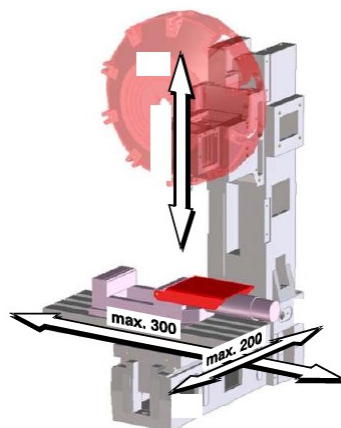
#### 5.1.2 Vliv měřicího posuvu na obousměrnou odchylku kruhovitosti

Proměnlivým vstupním parametrem během testu byla posuvová rychlost. Závislost zmíněné obousměrné odchylky kruhovitosti na změně posuvu lze vyčíst z obr. 5.2. Jednotlivě naměřené odchylky jsou zobrazeny v grafu, ve kterém jsou zobrazeny dva průběhy. První průběh, znázorněný modrou barvou, je měření vpředu na pracovním stole a druhý průběh, znázorněný červenou barvou, je měření vzadu na pracovním stole. V prvním průběhu lze vidět, že obousměrná odchylka kruhovitosti

stoupá v rozmezí posuvů 250 až 1000 mm/min rovnoměrně a od 1000 do 1500mm/min se stoupání skoro zastaví a rozdíl odchyly naměřené mezi těmito posuvy je nepatrný. Druhý průběh se znatelně od prvního liší. Od posuvu 250 do 750mm/min odchylna rovnoměrně stoupá, poté do posuvu 1250mm/min zase pomalu klesá na hodnotu, která byla naměřena při prvním posuvu a v posledním posuvu se zase vyhoupe k hodnotě naměřené při 750mm/min.



Obr. 5.2 Porovnání vlivu posuvu na obousměrnou odchylnu kruhovitosti v měřeném místě vpředu a vzadu roviny XY



Obr. 5.3 Detail systému saní pracovního stolu a vřetena

Ze zjištěných dat je patrné, že odchylny naměřené v rovině XY se příliš nemění se vzrůstajícím posuvem, proto není nutné v této rovině měřit různými posuvy. Naopak je rozdíl ve zvoleném místě měření. Z grafu lze vypožorovat, že v našem případě byl velký rozdíl odchylny naměřených vpředu a vzadu. To může být dáno konstrukcí příčných a podélných saní a jejich uchycením, jak lze vidět na obr. 5.3 a hlavně velikostí detekovaných chyb zapojených os.

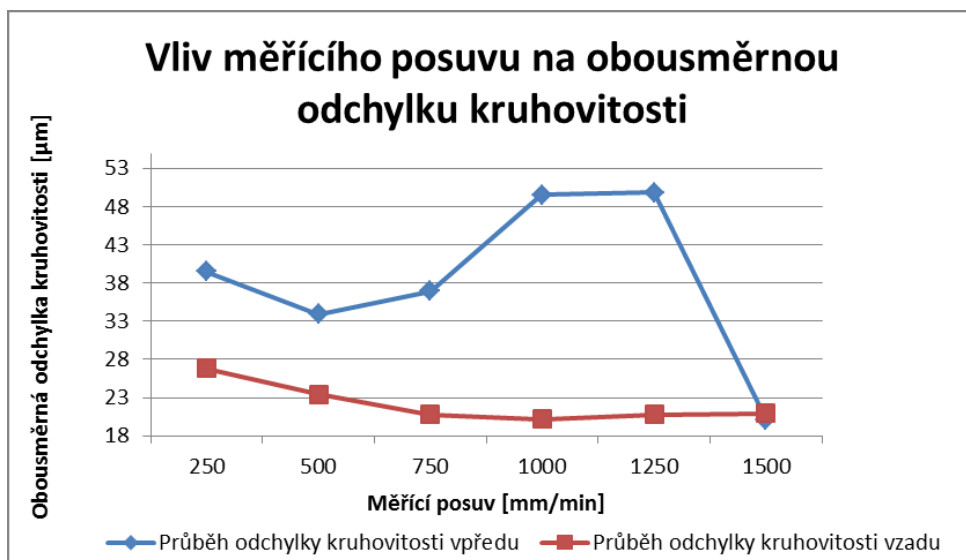
## 5.2 Vyhodnocení měření v rovině YZ v obou místech měření

### 5.2.1 Zhodnocení naměřených diagnostických chyb

Jak už bylo zmíněno v kapitole 4.2, kvůli malému pracovnímu rozsahu stroje jsme museli měřit v rovině YZ částečný úhel v rozsahu  $120^\circ$ . Bohužel v tomto rozsahu se nedají změřit chyby stroje, a proto se jim zde nelze věnovat.

### 5.2.2 Vliv měřicího posuvu na obousměrnou odchylku kruhovitosti

Proměnlivým vstupním parametrem během testu byla posuvová rychlost. Závislost zmíněné obousměrné odchylky kruhovitosti na změně posuvu lze vyčíst z obr. 5.4. Naměřené odchylky jsou zobrazeny v grafu. První průběh, znázorněný modrou barvou, je měření vpředu na pracovním stole a druhý průběh, znázorněný červenou barvou, je měření vzadu na pracovním stole. V prvním průběhu lze vidět, že obousměrná odchylka kruhovitosti je velmi nestálá a v závislosti na posuvu se její hodnota značně mění. Při posledním měření posuvem 1500mm/min je její rozdíl od měření posuvem 1250mm/min v desítkách mikrometrů. Druhý průběh je značně odlišný od prvního. Od posuvu 250 do 750mm/min odchylka rovnoměrně klesá, a poté se od 750 do 1500mm/min mění jen nepatrně. Hodnota naměřená vzadu při posuvu 1500mm/min se téměř shoduje s hodnotou naměřenou vpředu.



Obr. 5.4 Porovnání vlivu posuvu na obousměrnou odchylku kruhovitosti v měřeném místě vpředu a vzadu roviny YZ

V grafu lze vidět, že v rovině YZ se odchylky v místě měření vpředu hodně mění se vzrůstajícím posuvem. Oproti tomu v druhém zvoleném místě vzadu je rozdíl odchylek nepatrný. Je také rozdíl mezi zvoleným místem měření. V našem případě se jak průběh, tak hodnoty odchylek značně liší ve zvolených místech měření. V této

rovině se i liší celkový průběh obou odchylek. To se dá přičíst velikosti detekovaných chyb ve zvoleném místě měření a také konstrukcí příčných saní a jejich uchycení, jak lze vidět na obr. 5.3

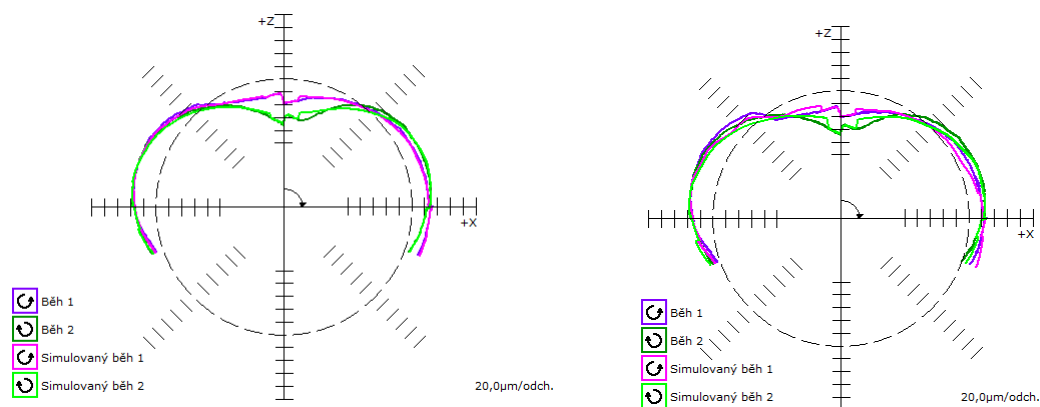
### **5.3 Vyhodnocení měření v rovině ZX v obou místech měření**

#### **5.3.1 Zhodnocení naměřených diagnostických chyb**

##### **– Zhodnocení naměřených diagnostických chyb v měřeném místě vpředu**

Průběh měření je znázorněn na obr. 5.5 vlevo. Z celkové chyby kruhovitosti je nejvíce zastoupená chyba (39%) příčná vůle v ose Z a hned druhá v pořadí je příčná vůle v ose X (12%). Obě vůle jsou asymetrické a vyskytnou se, pokud jsou ve vedení stroje nějaké vůle. Výsledkem těchto chyb jsou nekruhové otvory při výrobě kruhovou interpolací. Třetí nejvýraznější chybou je mrtvý chod neboli axiální vůle v ose Z, která je zastoupená 12%. Tato chyba vznikne, pokud jsou ve vedení stroje nějaké vůle, díky kterým vznikne v grafu skok směrem ke středu při změně směru pohybu. Další zastoupenou chybou je kolmost. Ta má 12% zastoupení z celkové chyby kruhovitosti. Možnou příčinou může být opotřebení vedení stroje, díky kterému vznikají v osách stroje určité vůle, nebo osy Z a X nesvírají úhel 90°. Při výskytu této chyby není možné dosáhnout kolmosti při obrábění čelních ploch. Další významnou chybou je mrtvý chod (axiální vůle) osy X v zastoupení 7%. Po ní následují amplituda cyklické chyby osy Z (5%) a amplituda cyklické chyby osy X (4%). Příčinou vzniku cyklické chyby může být nerovnoměrné stoupání závitu kuličkového šroubu nebo jeho uložení může být excentrické, jejichž následkem jsou rozměrové chyby obrobené součásti. Po těchto chybách se vyskytují chyby zpoždění serva v ose Z (4%) a zpoždění serva v ose X (4%). Tyto chyby jsou vlastně reverzační špičky a jejich příčinou vzniku může být problém se servosystémem nebo pohonem osy. Důsledkem může být zanechání malé plošky na povrchu kruhově interpolované dráhy. Poslední chybou je neshoda serva v zastoupení 1%.





Obr. 5.5 Vykreslený graf roviny ZX v měřeném místě vpředu (vlevo) a vzadu (vpravo)

#### – Zhodnocení naměřených diagnostických chyb v měřeném místě vzadu

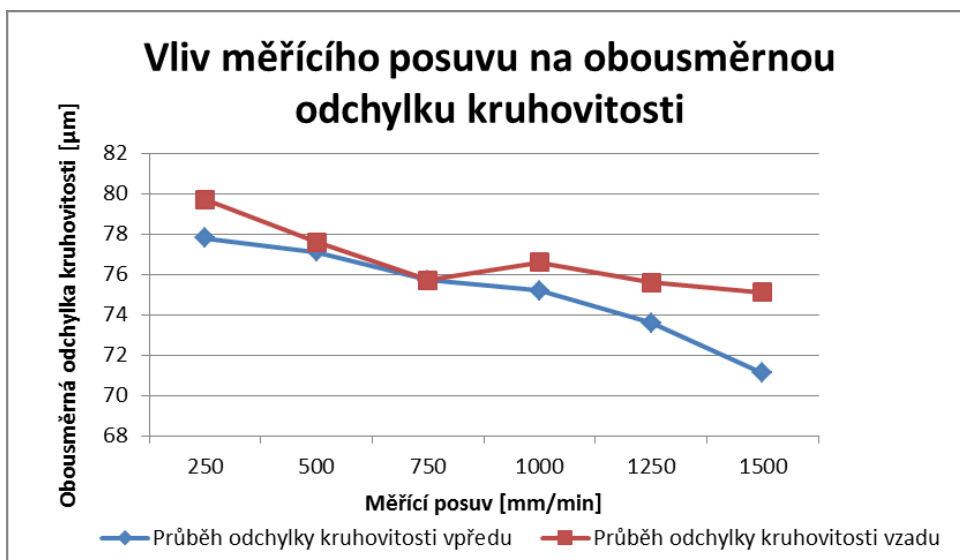
Průběh měření je znázorněn na obr. 5.4 vpravo. Z diagnostiky veškerých chyb je procentuálně nejvíce zastoupená kolmost, která je zastoupena 19% z celkové chyby kruhovitosti. Jednou z příčin může být opotřebení vedení stroje, díky kterému mohou vznikat v osách stroje určité vůle. Pokud se vyskytuje tato chyba, není možné dosáhnout ideální kolmosti při obrábění čelních ploch. Druhou a třetí výraznou chybou jsou příčné neboli boční vůle osy Z (16%) a osy X (13%). Tyto chyby jsou asymetrické. Čtvrtou chybou je amplituda cyklické chyby osy Z (11%) a její vznik může být připsán nerovnoměrnému stoupání závitu kuličkového šroubu nebo jeho uložení může být excentrické. Důsledkem toho jsou rozměrové chyby obrobené součásti. Pátou chybou je mrtvý chod osy X neboli axiální vůle v ose Y a má 15% zastoupení. Z grafu lze usoudit, že se jedná o axiální vůli zápornou. Příčinou může být vůle ve vedení stroje, díky které vznikne v grafu skok směrem ke středu při změně směru pohybu. Na tuto chybu navazuje hned axiální vůle v ose Z, která je zastoupena 9%. Další chybou je zpoždění serva (reverzní špičky) v ose X (6%) a pak amplituda cyklické chyby v ose X (6%). Po této chybě se vyskytuje neshoda serva, zastoupená 5% a jako poslední je zpoždění serva v ose Z (4%).

#### 5.3.2 Vliv měřicího posuvu na obousměrnou odchylku kruhovitosti

Závislost zmíněné obousměrné odchylky kruhovitosti na změně posuvu lze vidět na obr. 5.6. Odchylky, zjištěné během měření, jsou zobrazeny v grafu. První průběh, znázorněný modrou barvou, je měření vpředu na pracovním stole a druhý průběh, znázorněný červenou barvou, je měření vzadu na pracovním stole. První průběh se od druhého liší tím, že v celém rozsahu měření tj. od posuvu 250 do 1500mm/min obousměrná odchylka kruhovitosti téměř rovnoměrně klesá. V druhém průběhu lze vidět, že odchylka kruhovitosti od posuvu 250 do 750mm/min rovnoměrně klesá. Zde



se hodnota odchylky shoduje s hodnotou naměřenou v prvním místě měření (vpředu). Při posuvu 1000mm/min odchylka mírně stoupne a poté do posuvu 1500mm/min zase rovnoměrně klesne.



Obr. 5.6 Porovnání vlivu posuvu na obousměrnou odchylku kruhovitosti v měřeném místě vpředu a vzadu roviny ZX

V rovině ZX, se průběh odchylek chová úplně jinak než v předešlých rovinách. Oba průběhy se v hodnotách moc neliší a rozdíl hodnot u jednotlivých průběhů není taky velký. Hlavním rozdílem je, že hodnoty odchylky v místě měření vzadu jsou větší než hodnoty naměřené vpředu a velikosti odchylek v obou místech měření jsou větší než v předešlých rovinách. Tato skutečnost lze přičíst zapojení os Z a X a výskytu množství chyb v těchto osách. V předešlých rovinách byla zapojená osa Y, ve které nejspíš nebyl takový podíl chyb.

## Závěr

Cílem této práce bylo měření přesnosti obráběcího stroje pomocí měřicího systému Ballbar od společnosti Renishaw. Toto měření bylo provedeno na CNC frézce EMCO PC Mill 155 s řídicím systémem SINUMERIK 850D. Měření proběhlo ve všech rovinách a dvou měřených místech pracovního stolu a měnilo se celkem 6 posuvů. Celkem tedy bylo provedeno 36 měření. Také byl popsán vliv měřicího se posuvu a změny měřeného místa na obousměrnou odchylku kruhovitosti.

V rovině XY v místě měření vpředu při všech posuvech byla nejvíce zastoupená chyba kolmosti. Ta může být zaviněna špatnou montáží jednotlivých součástí stroje. Ve většině případů jde o nevyrovnanost stroje nebo i místní prohnutí vedení. Díky tomu nejde dosáhnout kolmosti u obrobku při jeho obrábění čelem nástroje. Pokud se tato chyba objevuje v jednom místě, nemusí být řešením velká oprava, ale stačí pouze přemístění procesu obrábění do jiného místa, které není touto chybou postižené. Bohužel v našem případě toto není možné, protože v měření místa vzadu bylo zjištěno, že při posuvu 250mm/min je nejvíce zastoupena zase kolmost. Při měření posuvy 500 až 1500mm/min se tato chyba posunula na druhé místo a na prvním se objevila příčná vůle, která vzniká, pokud jsou ve vedení stroje vůle. K odstranění nebo zamezení vzniku těchto chyb je nutná eliminace těchto vůlí ve vedení, proto bych navrhl provést nové vyrovnaní os a kontrolu opotřebení vedení.

V rovině ZX v místě měření vpředu při všech posuvech byla nejvíce zastoupená chyba příčné vůle v ose Z. V druhém místě měření vzadu se tato chyba také vyskytla na prvním místě kromě posuvu 500mm/min, kdy se na prvním místě objevila kolmost. Tyto chyby vznikají, pokud jsou ve vedení stroje vůle a k jejich odstranění nebo zamezení je nutná eliminace těchto vůlí ve vedení, proto je nutné také provést nové vyrovnaní os a kontrolu opotřebení vedení.

Na výskyt všech ostatních chyb má vliv převážně vůle ve vedeních stroje, proto je vhodné tato vedení zkontrolovat, a pokud se zjistí velké opotřebení těchto součástí, je nutné je vyměnit. U detekovaných cyklických chyb je nutné zkontrolovat kuličkový šroub a také vyvažovací mechanismus stroje. Pokud to bude nutné, provede se seřízení těchto součástí.

Z hlediska vlivu měřicího se posuvu a měřeného místa na obousměrnou odchylku kruhovitosti jsem došel k závěru, že největší vliv na odchylku a vůbec celé měření má místo měření. U změny posuvu nejsou zaznamenány příliš velké rozdíly odchylek, a proto měření může být provedeno jedním posuvem, ale ve více místech pracovního stroje. Pokud to stroj a pracovní rozsah dovolí, je ideální provést měření aspoň a 6 místech (na obou krajích a uprostřed vždy vpředu a vzadu).

## Použitá literatura

- [1] ERAZIM, K. *Kontrola přesnosti obráběcích strojů*. Praha: SNTL, 1961. 227 s.
- [2] Factory automation [online]. 2014 [cit. 2015-02-02]. Dostupné z WWW: <http://factoryautomation.cz/co-jsou-to-cnc-stroje-zjistete-co-umi/>.
- [3] MAREK, J. UCEN 0. *CNC obráběcí stroje. 1. Vydání*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2010, 103 s. ISBN 978-80-248-2329-4 (BROŽ.).
- [4] BRYCHTA J., ČEP R., PETRŮ J. *Výrobní stroje obráběcí*. Ostrava: VŠB Technická univerzita Ostrava, 2012, 140 s. ISBN 978-80-248-2941-8
- [5] HUMÁR, A. *Technologie i technologie obrábění: 1. část*. Brno: VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2003. 138 s. Studijní opory pro magisterskou formu studia "Strojírenská technologie".
- [6] DEMEČ, P.: *Presnosť obrábacích strojov a jej matematické modelovanie*. Vienaľa Košice, 2001. ISBN 80-7099-620-X
- [7] BRENÍK, P., PÍČ, J. *Obráběcí stroje – Konstrukce a výpočty*, Praha SNTL 1986
- [8] PILC, J. , STANCEKOVÁ, D. *Základy stavby obrábacích strojov*. Žilina: EDIS, 2004. ISBN 80-8070-281-0
- [9] MEHRABI, M.G.; O'NEAL, G. *Improving machining accuracy in precision line boring* Netherland: Kluwer Academic Publisher, 2002.
- [10] ETALON AG [online]. [cit. 2015-02-15]. Dostupné z: <http://www.etalon-ag.com/>.
- [11] IBARAKI, S., KNAPP W.. *Indirect measurement of volumetricky accuracy for three-axis and five-axis machine tools: Review. Automation Technology* [online]. 2012, roč. 6, č. 2 [cit. 2015-02-20].
- [12] ČSN ISO 230-4. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 4: Zkoušky kruhové interpolace u číslicově řízených obráběcích strojů*. Praha: Český normalizační institut, 1997.
- [13] Renishaw [online]. 2010 [cit. 2015-03-10]. Dostupné z: [www.renishaw.cz](http://www.renishaw.cz) a software Renishaw
- [14] AGUADO S., SAMPER D., SANTOLARIA J., AGUILAR J. J. *Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements. International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2012, vol. 53, issue 1, s. 160-169. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695511002173>.
- [15] ČSN ISO 230-1. *Zásady zkoušek obráběcích strojů - Část 1: Geometrická přesnost strojů pracujících bez zatížení nebo za dokončovacích podmínek obrábění*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

- [14] TICHÁ, Š. *Strojírenská technologie Část 1*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2004, 109 s.
- [15] Interferometry a vlastnosti laserového záření: Úloha c.3. In: *Optics.fjfi.cvut.cz* [online]. 2012 [cit. 2014-01-04]. Dostupné z:  
[http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP\\_03.pdf](http://optics.fjfi.cvut.cz/files/pdf/ZPOP_03.pdf).
- [16] BURGE, James H., Peng SU, Chunyu ZHAO a Tom ZOBRIST. Use of a commercial laser tracker for optical alignment. *Optical System Alignment and Tolerancing* [online]. 2007, c. 6676 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z:  
[http://www.loft.optics.arizona.edu/documents/journal\\_articles/Burge%20Proc.%20SPIE%2066760E.pdf](http://www.loft.optics.arizona.edu/documents/journal_articles/Burge%20Proc.%20SPIE%2066760E.pdf).
- [17] MRKVICA, I., ADAMEC, J. *Týmová cvičení z předmětu speciální technologie v obrábění*, Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2011, 85 s. ISBN 978-80-248-2721-6

## Seznam příloh

- Příloha č.1 Diagnostická tabulka a graf s hodnotami odchylky kruhovitosti pro rovinu XY v měřeném místě vpředu
- Příloha č.2 Graf s hodnotami odchylky kruhovitosti pro rovinu YZ v měřeném místě vpředu
- Příloha č.3 Diagnostická tabulka a graf s hodnotami odchylky kruhovitosti pro rovinu ZX v měřeném místě vpředu
- Příloha č.4 Diagnostická tabulka a graf s hodnotami odchylky kruhovitosti pro rovinu XY v měřeném místě vzadu
- Příloha č.5 Graf s hodnotami odchylky kruhovitosti pro rovinu YZ v měřeném místě vzadu
- Příloha č.6 Diagnostická tabulka a graf s hodnotami odchylky kruhovitosti pro rovinu ZX v měřeném místě vzadu